

**A. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA
UN BANCO DE PRUEBAS DE UNA BOMBA DE DESPLAZAMIENTO
POSITIVO (BDP)**

SANDRA MILENA ROZO QUINTERO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRODUCCIÓN
PEREIRA
2020

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN BANCO
DE PRUEBAS DE UNA BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO (BDP)

SANDRA MILENA ROZO QUINTERO

Trabajo de grado

Director:
M.Sc. Carlos Alberto Montilla Montaña

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRODUCCIÓN
PEREIRA
2020

Nota de aceptación:

Director del trabajo

Jurado

Jurado

Pereira, septiembre de 2020

CONTENIDO

	Pág.
0. INTRODUCCIÓN	16
0.1. ESTADO DEL ARTE	16
0.2. OBJETIVO	21
0.3. METODOLOGÍA	22
1. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES ACTUALES DEL BANCO HIDRÁULICO	26
1.1.BANCO DE PRUEBAS	26
1.1.1. Elementos del banco hidráulico	27
1.1.2. Elementos eléctricos	30
2. DEFINICIÓN Y DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DEL SISEMA DE CONTROL Y SELECCIÓN DE SOFTWARE Y HARDWARE NUEVO	31
2.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	31
2.2.PROPUESTA DE SOLUCIÓN	31
2.2.1. Análisis para el caudal	33
2.2.2. Análisis para el torque	37
2.2.3. Eficiencia de la bomba	39
2.2.4. Diagrama de flujo	40
2.2.5. Diagrama de bloques del sistema de control	42
2.3.SELECCIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE REQUERIDO POR EL BANCO HIDRÁULICO	43
2.3.1. Encoder Incremental	43
2.3.2. Sensor de flujo	44

	Pág.
2.3.3. Microcontrolador	46
2.3.4. Amplificador operacional	46
2.3.5. Transmisor de celda de carga	47
2.4.PROGRAMA E INTERFAZ GRÁFICA	48
2.4.1. Caracterización de la celda de carga	48
2.4.2. Caracterización del sensor de flujo	51
2.4.3. Elaboración del Instrumento Virtual Server (VIs) en LabVIEW	53
3. MONTAJE Y PUESTA A PUNTO	61
3.1.Montaje Mecánico	61
3.1.1. Encoder Incremental	61
3.1.2. Sensor de caudal	65
3.1.3. Placa de montaje	66
3.1.4. Diagrama del sistema	67
3.1.5. Conexiones de los componentes electrónicos	68
4. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
4.1.DATOS TOMADOS EN EL BANCO HIDRÁULICO, PARA LA BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO TIPO ENGRANAJES EXTERNOS, MEDIANTE EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	69
4.2.PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA DE ENGRANAJES EXTERNOS	76
4.2.1. Determinación de la potencia de accionamiento [BkW]	76
4.2.2. Determinación de la potencia del fluido [FkW]	77
4.2.3. Determinación de la eficiencia de la bomba [η]	77

	Pág.
4.3.VALIDACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA DE ENGRANAJES EXERNOS	82
4.3.1. Análisis de la curva Caudal contra Presión	82
4.3.2. Análisis de la curva Potencia contra Presión	83
4.3.3. Análisis de la curva Eficiencia contra Presión	85
4.4. DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES K1 Y K2 A PARTIR DE LOS DATOS TOMADOS EN EL BANCO HIDRÁULICO	86
5. ELABORACIÓN DEL MANUAL DE OPERACIÓN PARA EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL BANCO HIDRÁULICO	87
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	99

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cantidades físicas y símbolos de las variables involucradas en las pruebas para bancos hidráulicos, según norma ANSI/NFPA T3.9.17	17
Tabla 2. Información técnica de la bomba de engranajes	27
Tabla 3. Información técnica motor eléctrico basculante	27
Tabla 4. Información depósito de aceite	28
Tabla 5. Información técnica celda de carga	28
Tabla 6. Información técnica de la válvula	28
Tabla 7. Información técnica del flujómetro	29
Tabla 8. Información técnica del manómetro	29
Tabla 9. Información técnica del variador de frecuencia	30
Tabla 10. Información técnica del contactor eléctrico	30
Tabla 11. Variables involucradas en el proceso	33
Tabla 12. Información técnica del encoder	44
Tabla 13. Información técnica del sensor de flujo	45
Tabla 14. Información técnica del microcontrolador	46
Tabla 15. Información técnica del amplificador operacional	47
Tabla 16. Información técnica Transmisor de celda de carga HX711	48
Tabla 17. Valores obtenidos para la caracterización de la celda de carga	50
Tabla 18. Valores obtenidos para la caracterización del sensor de flujo a una velocidad de rotación de 1800 rpm	51
Tabla 19. Valores obtenidos para la caracterización del sensor de flujo a una velocidad de rotación de 2000 rpm	52

	Pág.
Tabla 20. Datos experimentales promedio de la bomba de engranajes externos operando a 1600 rpm	70
Tabla 21. Datos experimentales promedio de la bomba de engranajes externos operando a 2000 rpm	70
Tabla 22. Datos experimentales promedio de la bomba de engranajes externos operando a 2200 rpm	71
Tabla 23. Datos experimentales promedio de la bomba de engranajes externos operando a 2400 rpm	71
Tabla 24. Tabla de resultados para la bomba de engranajes externos, operando a una velocidad de 1600 rpm	78
Tabla 25. Tabla de resultados para la bomba de engranajes externos, operando a una velocidad de 2000 rpm	79
Tabla 26. Tabla de resultados para la bomba de engranajes externos, operando a una velocidad de 2200 rpm	80
Tabla 27. Tabla de resultados para la bomba de engranajes externos, operando a una velocidad de 2400 rpm	81
Tabla 28. Comparación de caudales entre dos rangos de presión	82
Tabla 29. Expresiones de la línea de tendencia para las curvas de Caudal contra Presión	83
Tabla 30. Expresiones de la línea de tendencia para las curvas de Potencia de accionamiento contra Presión	84
Tabla 31. Expresiones de la línea de tendencia para las curvas de Eficiencia contra Presión	86
Tabla 32. Valores de las constantes K1 y K2 para el caudal real de la bomba de engranajes externos	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Curvas típicas de Caudal para una bomba de desplazamiento positivo	18
Figura 2. Curvas típicas de potencia de entrada a la bomba (W_i) para una bomba de desplazamiento positivo	19
Figura 3. Curvas típicas de eficiencia volumétrica (η_v) para una bomba de desplazamiento positivo	20
Figura 4. Curvas de desempeño de una bomba de desplazamiento positivo rotativa para diferentes velocidades de rotación	23
Figura 5. Clasificación de las bombas de desplazamiento positivo (BDP)	24
Figura 6. Circulación de fluido a través de una bomba de engranajes externos	25
Figura 7. Banco de pruebas con bomba de engranajes	26
Figura 8. Bomba de engranajes externos	27
Figura 9. Motor trifásico basculante	27
Figura 10. Depósito de aceite	28
Figura 11. Celda de carga	28
Figura 12. Válvula reguladora de caudal	28
Figura 13. Flujómetro Hedland	29
Figura 14. Manómetro de Bourdon	29
Figura 15. Variador de frecuencia	30
Figura 16. Contactador eléctrico	30
Figura 17. Curvas características de una bomba de desplazamiento positivo rotoestáticas	33

	Pág.
Figura 18. Curvas características de $Q \sim P$ a diferentes velocidades angulares	33
Figura 19. Esquema de caudales en una BDP rotativa	34
Figura 20. Esquema de torques para una BDP rotativa	38
Figura 21. Diagrama de flujo del proceso de funcionamiento del banco hidráulico de la BDP	41
Figura 22. Diagrama de bloques para el banco de pruebas de una bomba de desplazamiento positivo	42
Figura 23. Disco codificador de un encoder	43
Figura 24. Encoder incremental	44
Figura 25. Esquemas del sensor de flujo con algunas medidas	45
Figura 26. Sensor de flujo	45
Figura 27. Microcontrolador - Arduino MEGA 2560	46
Figura 28. Diagrama electrónico del amplificador operacional	47
Figura 29. Transmisor de celda de carga HX711	47
Figura 30. Celda con masas patrón de 52, g	49
Figura 31. Celda con masa patrón de 552, 2 g	49
Figura 32. Caracterización de la celda de carga	50
Figura 33. Caracterización del sensor de flujo $N=1800$ rpm	51
Figura 34. Caracterización del sensor de flujo $N=2000$ rpm	52
Figura 35. Diagrama de bloques simplificado del sistema de control para un banco de pruebas de una bomba de desplazamiento positivo (BDP)	54
Figura 36. Interfaz gráfica del sistema de control para un banco de pruebas de una bomba de desplazamiento positivo (BDP)	54

	Pág.
Figura 37. Diagrama de flujo <i>LabVIEW</i>	55
Figura 38. Diagrama de bloques para guardar la información	56
Figura 39. Bloque para guardar la información en <i>LabVIEW</i>	57
Figura 40. Diagramas de bloques para la comunicación	57
Figura 41. Bloque para comunicación <i>LabVIEW</i>	58
Figura 42. Diagrama de bloques para el procesamiento de datos	58
Figura 43. Bloque para el procesamiento de datos <i>LabVIEW</i>	59
Figura 44. Diagrama de bloques del registro de datos	59
Figura 45. Bloque para el registro de datos en <i>LabVIEW</i>	60
Figura 46. Diseño del montaje encoder	61
Figura 47. Plano de la polea eje motor	63
Figura 48. Plano de la polea del encoder	64
Figura 49. Montaje final del encoder	64
Figura 50. Plano del soporte del encoder	65
Figura 51. Montaje del sensor de flujo	65
Figura 52. Plano de la placa vertical para soporte de elementos	66
Figura 53. Montaje de los elementos en la placa vertical	67
Figura 54. Diagrama del sistema	67
Figura 55. Sistema de adquisición integrado	68
Figura 56. Gráfica de Intervalos de Confianza para el caudal cuando a bomba está operando a 1600 rpm	72

	Pág.
Figura 57. Gráfica de Intervalos de Confianza para el caudal cuando a bomba está operando a 2000 rpm	73
Figura 58. Gráfica de Intervalos de Confianza para el caudal cuando a bomba está operando a 2200 rpm	73
Figura 59. Gráfica de Intervalos de Confianza para el caudal cuando a bomba está operando a 2400 rpm	74
Figura 60. Gráfica de Intervalos de Confianza para la fuerza cuando la bomba está operando a 1600 rpm	74
Figura 61. Gráfica de Intervalos de Confianza para la fuerza cuando la bomba está operando a 2000 rpm	75
Figura 62. Gráfica de Intervalos de Confianza para la fuerza cuando la bomba está operando a 2200 rpm	75
Figura 63. Gráfica de Intervalos de Confianza para la fuerza cuando la bomba está operando a 2400 rpm	76
Figura 64. Curvas características de la bomba de engranajes a una velocidad de rotación de 1600 rpm	78
Figura 65. Curvas características de la bomba de engranajes a una velocidad de rotación de 2000 rpm	79
Figura 66. Curvas características de la bomba de engranajes a una velocidad de rotación de 2200 rpm	80
Figura 67. Curvas características de la bomba de engranajes a una velocidad de rotación de 2400 rpm	81
Figura 68. Curvas de Caudal contra Presión para diferentes velocidades de rotación	83
Figura 69. Curvas de Potencia contra Presión para diferentes velocidades de rotación	84
Figura 70. Curvas de Eficiencia contra Presión para diferentes velocidades de rotación	85

	Pág.
Figura 71. Identificación de algunos elementos del banco hidráulico	87
Figura 72. Sistema basculante (celda de carga)	87
Figura 73. Variador de frecuencia y contactor eléctrico	88
Figura 74. Pantalla inicial del sistema de adquisición de datos	89
Figura 75. Buscador	89
Figura 76. Verificación de la comunicación Microcontrolador-computador	90
Figura 77. Ubicación y nombre del archivo	90
Figura 78. Ingreso valor de la velocidad de rotación	91

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL ARDUINO	99
ANEXO B. PLANOS	105
ANEXO C. MÓDULO DE ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES DEL BANCO HIDRÁULICO	111
ANEXO D. DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE	112

RESUMEN

El desarrollo de este proyecto es presentado como trabajo para graduación de la Maestría en Sistemas Automáticos de Producción. Se diseñó e implementó un sistema de control para banco de pruebas usando una bomba de desplazamiento positivo (BDP), consiguiendo automatizar el proceso fijando la velocidad de rotación, de tal forma que, al registrarse un cambio en ésta, de manera automática el variador aumente o disminuya su frecuencia, garantizando un valor constante de la velocidad de rotación. Con este método, se logró darle al banco un manejo sencillo, obteniendo datos más precisos y sistematizando la información, para finalmente obtener las curvas características de operación de la bomba.

El diseño, desarrollo e implementación del sistema de control, se trabajó en un banco hidráulico con una bomba de engranajes externos; se utilizó un equipo de práctica en actividades de tipo académico perteneciente al Laboratorio de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. La primera etapa consistió en caracterizar los componentes actuales del banco hidráulico, y determinar su pertinencia dentro del sistema de control automático, ya con esto, poder definir la arquitectura de control, seleccionar los nuevos componentes e integrarlos al banco hidráulico.

Fue necesario desarrollar un aplicativo de software para adquirir los valores de caudal (Q) y Fuerza (F) a diferentes velocidades de rotación (N) y de presión (P), información necesaria para la elaboración de las curvas de operación de la bomba.

Para verificar la veracidad de los datos obtenidos después de la implementación del sistema de control, se hace una comparación entre el comportamiento de las curvas para la bomba de engranajes externos obtenidas con estos datos y con las curvas características teóricas. Para sustentar su validez se realiza un análisis estadístico.

Finalmente, se escribe un manual de operación para la manipulación del banco hidráulico y del sistema de adquisición de datos. Este manual servirá como guía para la práctica en el curso de Laboratorio de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Se espera que este trabajo, al ser de naturaleza académica, fundamente el proceso formativo de los estudiantes de pregrado y de posgrado de la Universidad Tecnológica de Pereira, con el objetivo que se familiaricen con los sistemas de potencia fluida e instalaciones hidráulicas y que, con una práctica de laboratorio sencilla, puedan determinar las características de operación de una bomba de desplazamiento positivo.

0. INTRODUCCIÓN

0.1 ESTADO DEL ARTE

El principio básico de la potencia fluida consiste en aprovechar la fuerza producida por la presión de un fluido (líquido o gas) sobre las superficies que están en contacto con él. Si el fluido de trabajo es un líquido, como agua o aceite, se habla de hidráulica y si es un gas, se habla de neumática.

Los accionamientos hidráulicos, gracias a su alta intensidad de potencia, son de bajo peso y ocupan un espacio pequeño dentro de un montaje, lo que permite que tengan una amplia gama de aplicaciones hidráulicas en ingeniería mecánica y en la industria.

El estudio del desempeño de los componentes hidráulicos es de gran importancia para determinar su aplicabilidad en sistemas prácticos. De ahí que el desarrollo de bancos de pruebas hidráulicos atrajo la atención de muchos investigadores en diferentes países.

Hamid [13] en el año 2009, desarrolló un banco hidráulico de pruebas con fines educativos. En el banco diseñado se instaló una bomba de engranajes; y las pruebas del caudal frente presión y de la presión frente a la temperatura (con y sin sistema de refrigeración) se llevaron a cabo con éxito. El banco de pruebas se operaba manualmente por lo que *Hamid* recomendó desarrollar un programa que permitiera simular y operar los circuitos del banco de ensayos hidráulico y desarrollar un programa de control lógico programable (PLC) para controlar y operar los circuitos hidráulicos.

Chen y Yan [7] (2011) desarrollaron un banco de pruebas hidráulico que además realiza la función de adquisición de datos, visualización en tiempo real, configuración de salida, ajuste de presión, ahorro de datos de prueba y generación de informes. Se introdujo la arquitectura del banco de pruebas y se ilustró su método de diseño de software basado en LabVIEW. El sistema basado en LabVIEW tiene los siguientes logros: simplificación del diseño de hardware, interfaz de usuario amigable e informes inteligentes.

Michelson, Mueller y Schurman [20] (2012) analizaron circuitos utilizando un banco de pruebas hidráulico que contenía una bomba y una variedad de válvulas. Esta investigación se realizó para probar las capacidades del banco hidráulico y formular una clase de laboratorio para estudiantes de Ingeniería Mecánica en la Universidad Estatal de Dakota del Sur (SDSU). Para analizar las capacidades del banco de pruebas hidráulico, era necesario investigar diagramas de circuitos hidráulicos y construir un circuito para cada válvula a ser

probada. Una vez contruidos los circuitos hidráulicos, el sistema funcionaba a dos presiones diferentes, a 200 psi_a y a 400 psi_a.

Elshorbagy, Kandil y Latif [11] (2018) desarrollaron un banco de pruebas hidráulico que puede ser usado como unidad de enseñanza para reconocer la función de los componentes principales del sistema electrohidráulico, o que se puede utilizar en la investigación y desarrollo de circuitos hidráulicos. En el banco hidráulico se pueden probar unidades de bomba de desplazamiento positivo, válvulas de control direccional, válvulas de control de caudal, válvulas de retención y cilindros hidráulicos de diferentes fabricantes. Como plataforma de prueba, cuenta con un sistema electrohidráulico que incluye varios componentes hidráulicos y eléctricos, y un sistema de control basado en PLC se utiliza para controlar y ejecutar operaciones de prueba específicas.

A nivel local y más específicamente en el Laboratorio de Fluidos de la Universidad Tecnológica de Pereira, en el año 2014 *Arango y Soto* [3], con el fin de optar al título de Ingenieros Mecánicos, diseñaron y construyeron un banco hidráulico con fines educativos. El objetivo con el que se diseñó y construyó el banco de pruebas, fue obtener las curvas de desempeño de una bomba de desplazamiento positivo tipo paletas, a diferentes velocidades de rotación; y para lograrlo, trabajaron bajo la Norma ANSI/ (NFPA) T3.9.17 R1-1990 [1]. Esta Norma, describe los métodos de ensayo para la determinación práctica del comportamiento de las bombas de desplazamiento positivo bajo diferentes solicitudes de carga, e indica, como se deben presentar gráficamente.

Tomando como referencia los numerales 5 y 6 de la norma ANSI/ (NFPA) T3.9.17 R1-1990 [1], en la tabla 1 se presentan los símbolos usados para las variables involucradas en las pruebas y presentación de resultados; además las unidades respectivas, tanto para el sistema internacional, como para el sistema Inglés.

Tabla 1. Cantidades físicas y símbolos de las variables involucradas en las pruebas para bancos hidráulicos, según norma ANSI/NFPA T3.9.17

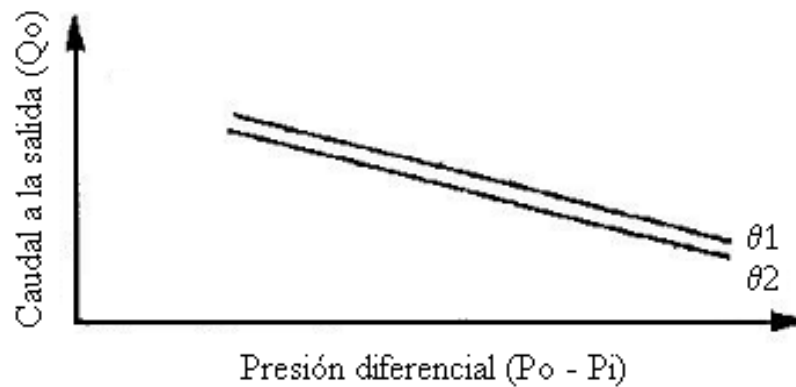
Symbol	Meaning	Units of measure	
		SI	US
Steady state			
Q	Flow	Litre per minute	Gallone per minute
η	Efficiency	percent	percent
T	Torque	Newton-metre	lb-in
P	Pressure	bar	psi
N	Rotational speed	rpm	rpm
W	Power	Kilowatt	Horsepower
D	Dispalcement	mL/rev	in ³ /rev
θ	Temperature	°C	°F

Tomado de la norma ANSI / (NFPA) T3.9.17 R1-1990 [1]

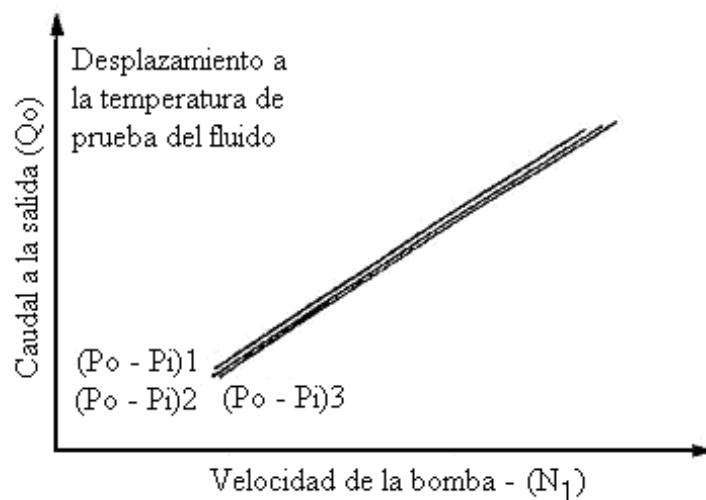
En el numeral 12.2.1, la norma ANSI/ (NFPA) T3.9.17, indica como debe ser el comportamiento de las gráficas de la bomba de desplazamiento positivo respecto a una presión diferencial con la temperatura de prueba como parámetro. En el numeral 12.2.2, muestra el comportamiento de las características de operación versus la velocidad de rotación con la temperatura de prueba como parámetro. En la figura 1 se muestra la curva típica de caudal de la bomba; en la figura 2 se muestra la curva típica de potencia a la entrada, y en la figura 3 la curva típica de la eficiencia, todas versus diferencia de presión y velocidad de rotación

Figura 1 Curvas típicas de Caudal para una bomba de desplazamiento positivo

a. Curvas típicas de Caudal (Q_o) vs. Presión diferencial



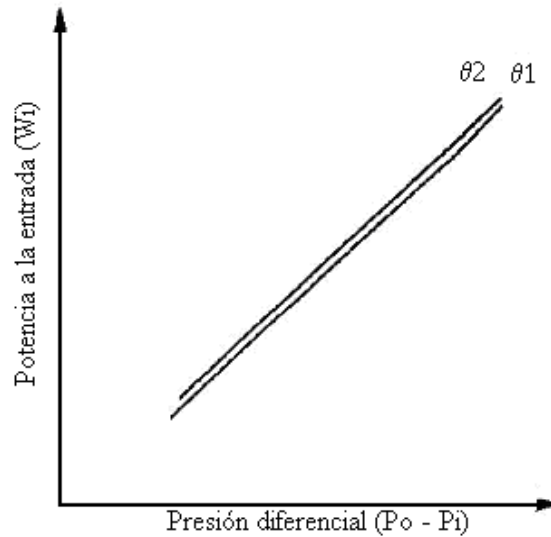
b. Caudal (Q_o) vs. Velocidad de rotación de la bomba (N).



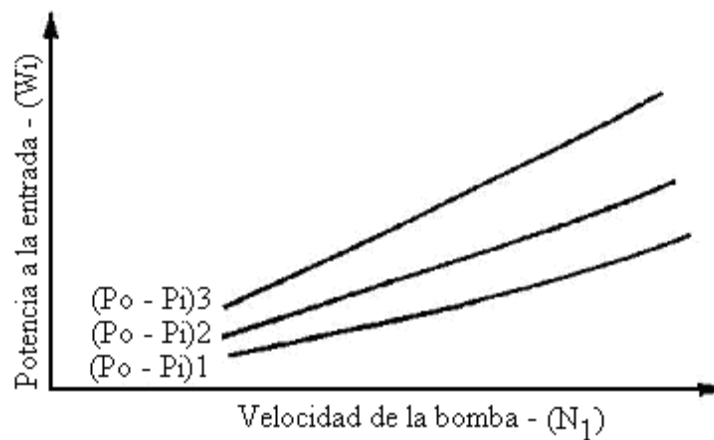
Tomado de la norma ANSI / (NFPA) T3.9.17 R1-1990 [1]

Figura 2. Curvas típicas de potencia de entrada a la bomba (W_i) para una bomba de desplazamiento positivo

a. Potencia de entrada a la bomba (W_i) vs. Presión diferencial



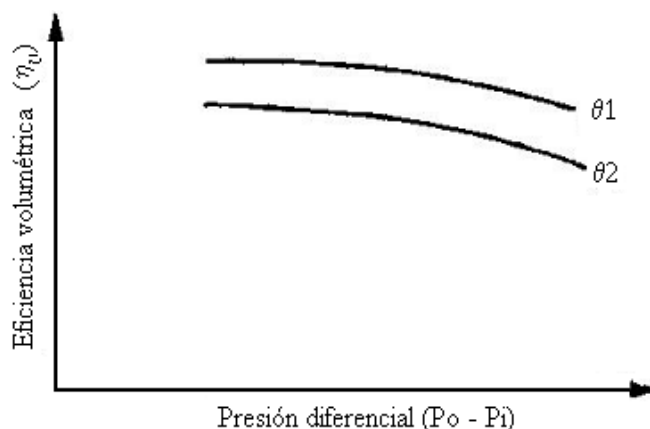
b. Potencia de entrada a la bomba (W_i) vs. Velocidad de rotación de la bomba (N).



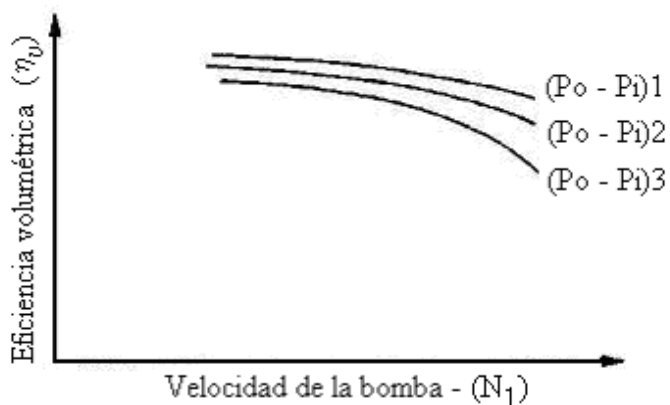
Tomado de la norma ANSI / (NFPA) T3.9.17 R1-1990 [1]

Figura 3. Curvas típicas de eficiencia volumétrica (η_v) para una bomba de desplazamiento positivo

Eficiencia volumétrica (η_v) vs. Presión diferencial



a. Eficiencia volumétrica (η_v) vs. Velocidad de rotación de la bomba (N).



Tomado de la norma ANSI / (NFPA) T3.9.17 R1-1990 [1]

En el año 2019 *Torres* [32], estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, realizó una adecuación al banco hidráulico diseñado y construido por *Arango y Soto* [3]. En este trabajo la bomba de paletas fue reemplazada por una bomba de engranajes externos, manteniendo el objetivo del banco: obtener las curvas de desempeño para la bomba de prueba.

La práctica de laboratorio que se desarrollaba en el banco hidráulico, hasta antes del presente trabajo, permite a partir de los datos tomados (velocidad de rotación, presión,

caudal y fuerza) y después de realizar los respectivos cálculos (torque, potencia de accionamiento y eficiencia), trazar las curvas de desempeño de la bomba de desplazamiento positivo para diferentes regímenes de operación. Durante el desarrollo de la práctica se presentaban varios inconvenientes: todas las mediciones y ajustes de variables, se hacían de forma manual, acarreando errores de precisión de tipo humano. Para la toma de datos, era necesario contar con al menos 4 personas, una primera para regular la presión (estrangulando la válvula de flujo), otra para medir la velocidad de rotación con un cuenta-revoluciones (que si se ubica mal, registra un valor errado de la señal), una tercera para girar la perilla del potenciómetro, quien según indicaciones de la segunda, debía aumentar o disminuir el valor de la frecuencia del variador hasta que en el cuenta-revoluciones apareciera un valor lo más cercano posible al que se había fijado como valor de velocidad constante; y la última encargada del registro manual de datos. Con tantas interferencias de tipo humano, era difícil garantizar la confiabilidad en los datos, aunque las curvas características de la bomba presentaran el comportamiento teórico esperado.

Buscando darles solución a los problemas previamente mencionados, surgió la necesidad de desarrollar el presente proyecto, que debe cumplir los siguientes requerimientos de diseño:

- Mantener la velocidad de rotación constante a medida que se varíe la presión de descarga en la bomba
- Darle al banco un manejo mucho más sencillo, siendo necesaria una sola persona para operarlo
- Obtener datos con mayor precisión y exactitud
- Sistematizar la información para que sea mucho más sencillo el posterior procesamiento de datos por parte de los estudiantes que realicen la práctica de laboratorio
- Darle una visión a los estudiantes de un sistema de control aplicado a un sistema de potencia fluida, caso a los que muy seguramente se deberán enfrentar en su desempeño profesional
- Obtener curvas características para la bomba, con valores mucho más cercanos a los entregados por el fabricante

0.2 OBJETIVOS

El objetivo general del presente proyecto es:

- Diseñar y construir un sistema de control automático para un banco de pruebas de una bomba de desplazamiento positivo (BDP).

Los objetivos específicos formulados son los siguientes:

- Definir la arquitectura de control que se utilizará para automatizar el proceso.
- Seleccionar los componentes de acuerdo a la arquitectura definida.

- Integrar los diferentes componentes en el banco de una bomba de desplazamiento positivo.
- Programar un aplicativo de software para adquirir los datos de Caudal (Q), Presión (P) y Fuerza (F), y graficar las curvas características de Caudal Vs Presión, Potencia Vs Presión y eficiencia Vs Presión de la bomba de desplazamiento positivo.
- Someter a prueba el funcionamiento del banco hidráulico.
- Elaborar un manual de operación para el banco hidráulico.

0.3 METODOLOGÍA

Teniendo definidos los objetivos, se plantean las siguientes etapas:

Etapla 1: Caracterizar los componentes actuales del banco hidráulico y determinar su pertinencia dentro del sistema de control automático.

Etapla 2: Definir la arquitectura de control para poder seleccionar los nuevos componentes.

Etapla 3: Integrar los nuevos componentes al banco hidráulico.

Etapla 4: Trabajar en un aplicativo de software que permita adquirir los valores de caudal (Q) y Fuerza (F) a diferentes velocidades de rotación (N) y de presión (P).

Etapla 5: Mediante una hoja de cálculo, obtener los resultados de potencia de accionamiento y eficiencia de la bomba. Con estos resultados, más los valores de presión y caudal, trazar las tres curvas características de operación de la BDP (caudal contra presión, potencia de accionamiento contra presión y eficiencia contra presión) a diferentes velocidades de rotación.

Etapla 6: Comparar las curvas teóricas de la bomba, con las curvas prácticas obtenidas con la prueba del equipo. Al verificar la validez de los valores obtenidos, realizar un análisis estadístico que sustente los resultados.

Etapla 7: Finalmente elaborar un manual de operación para el sistema de control del banco, que también servirá como guía de la práctica del curso de Laboratorio de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

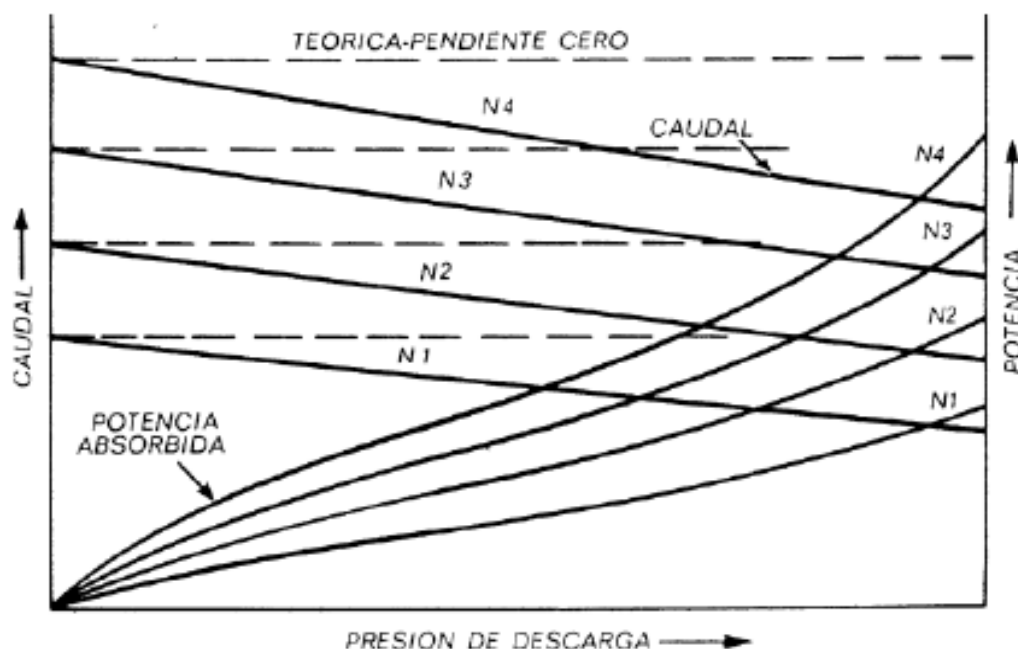
Esencialmente el alcance del presente trabajo es de naturaleza académica, fundamentalmente para complementar el proceso formativo de los estudiantes del programa de Ingeniería Mecánica, Tecnología Mecánica e Ingeniería de Manufactura, para que se familiaricen con los sistemas de potencia fluida e instalaciones hidráulicas y que con una práctica de laboratorio sencilla puedan determinar si la bomba a ensayar, se comporta de acuerdo a las características propias vistas en el curso teórico.

A nivel de la Maestría en Sistemas Automáticos de Producción, se resalta la futura aplicación en los cursos de automatización básica, sistemas digitales, potencia fluida y control, ya que en el diseño del sistema de control del banco se aplican los conceptos teóricos y prácticos de cada una de ellas. El banco hidráulico de la bomba de engranajes externos, específicamente puede servir de apoyo en algunas prácticas de los cursos ya mencionados, por ejemplo, en el curso de potencia fluida, puede determinar cuál es el comportamiento de una bomba en cuanto a flujo y carga, dos características importantes en el momento de querer diseñar un sistema hidráulico.

Al ser las bombas hidráulicas el elemento de mayor importancia en los bancos de pruebas, se hablará un poco más en detalle de éstas, en especial de las bombas de engranajes externos.

Con pocas excepciones, las bombas usadas en sistemas de potencia fluida, son de desplazamiento positivo, dado que estas, son capaces de mantener una relación prácticamente constante entre la velocidad de rotación y el caudal entregado a medida que la presión cambia, tal y como lo muestra la figura 4.

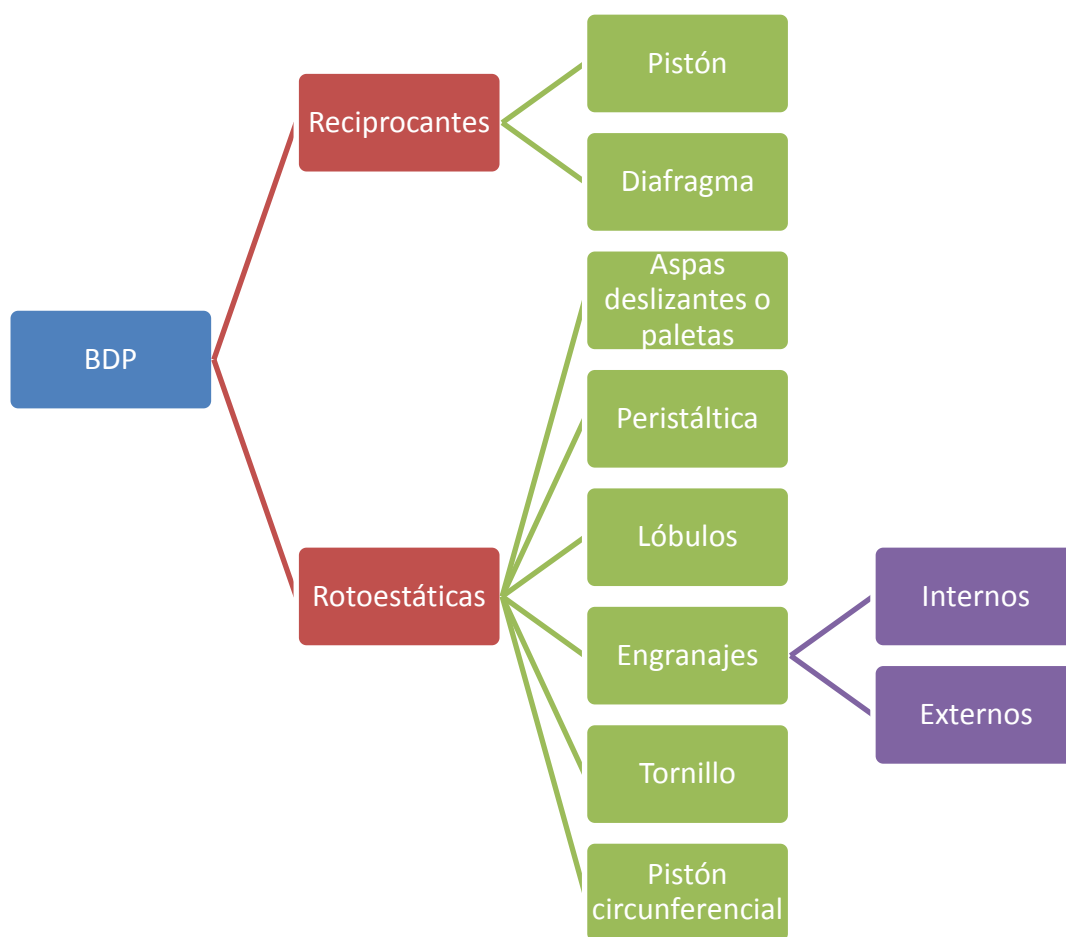
Figura 4. Curvas de desempeño de una bomba de desplazamiento positivo rotativa para diferentes velocidades de rotación. $N1 < N2 < N3 < N4$.



Tomado de: Selección de Bombas- Sistemas y Aplicaciones [34]

El órgano principal de las máquinas de desplazamiento positivo (desplazador) tiene la función de intercambiar energía con el líquido, lo que implica un desplazamiento del mismo. “Este órgano admite infinidad de diseños, y el campo abierto a la imaginación del ingeniero proyectista es tan grande, que constantemente aparecen en el mercado nuevas formas constructivas” [19]. No obstante, existe una clasificación para las bombas de desplazamiento positivo según su estructura interna y su modo de funcionamiento, la cual se puede observar en la figura 5.

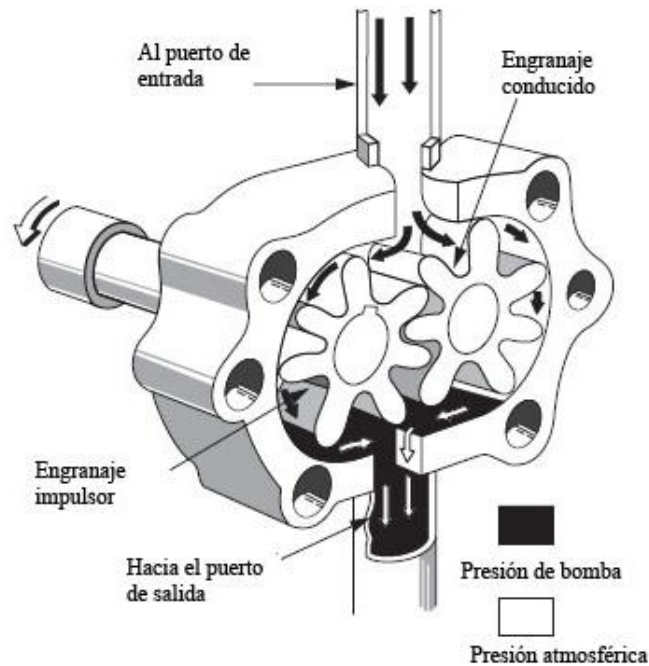
Figura 5. Clasificación de las bombas de desplazamiento positivo (BDP) según su estructura interna y su modo de funcionamiento



En el presente proyecto se trabajó con una bomba rotoestática de engranajes externos, las cuales se componen de dos piñones que se engranan entre sí dentro de la carcasa. El piñón motriz está unido al eje impulsor, que al rotar hace girar al piñón libre en sentido contrario, provocando un vacío en la cámara de entrada haciendo que el fluido ingrese a la bomba. El fluido que queda atrapado entre la carcasa y los dientes de rotación de los piñones, se

desplaza alrededor de la carcasa y es empujado a través del orificio de salida, tal como se observa en la figura 6. El aumento de presión en el fluido ocurre debido al efecto del engrane de los piñones.

Figura 6. Circulación del fluido a través de una bomba de engranajes externos.



Tomado de: http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica9.htm [30]

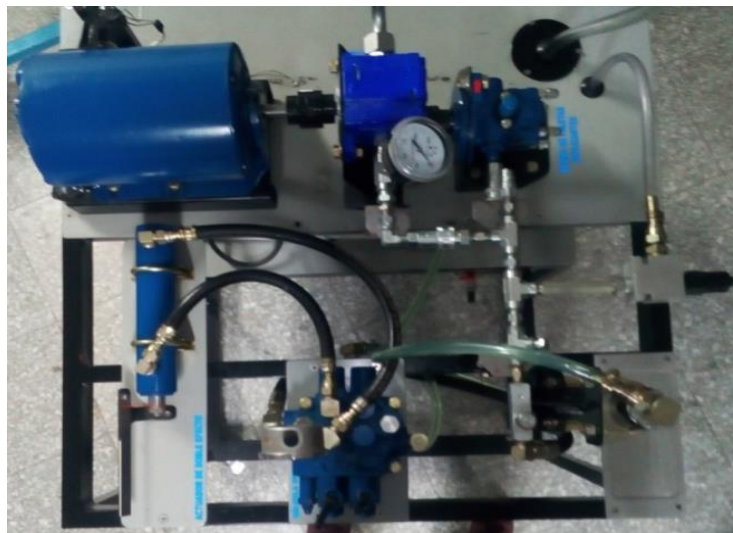
1. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES ACTUALES DEL BANCO HIDRÁULICO

1.1 BANCO DE PRUEBAS

El Laboratorio de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, cuenta con un banco hidráulico que permite estudiar el comportamiento de bombas de desplazamiento positivo (BDP) rotoestáticas. Este banco es el fruto de un proyecto de grado desarrollado en el año 2014 por los estudiantes Johan Sebastián Arango Ríos y Jhony Heriberto Soto Lopera de Ingeniería Mecánica [3], quienes lo diseñaron y construyeron con el fin de obtener los parámetros de operación de la bomba de aspas deslizantes a diferentes velocidades de rotación, y con dichos resultados, trazar las curvas características de ésta. En el año 2019 el estudiante Juan Camilo Torres Colorado [32], trabajó en una adecuación del banco, en la que se cambia la bomba de aspas deslizantes por una de engranajes externos, con el objeto igualmente de obtener las curvas de operación de esta bomba.

Para el desarrollo del diseño e implementación del sistema de control del banco hidráulico, se trabajó sobre la última adecuación realizada, es decir, en el banco hidráulico con la bomba de engranajes externos en operación, figura 7.

Figura 7. Banco de pruebas con bomba de engranajes



Tomado de: Adecuación del banco de pruebas de bomba de desplazamiento positivo... [32]

1.1.1 Elementos actuales del banco hidráulico. El banco de pruebas está compuesto por los siguientes elementos:

✓ **Bomba de engranajes**

Tabla 2. Información técnica de la bomba de engranajes [32]

Fabricante	SAUER DANFOSS
Tipo	Engranajes de dientes externos
Referencia	SNP2/5.5 S CI 06/0F
Peso neto	2.6 kgf (lb)
Desplazamiento	5.5 cm ³ /rev
Conexión de succión	1 1/16 in
Conexión de descarga	7/8 in
Caudal máximo (Qmax)	18 L/min
Presión nominal (P)	250 bar
Presión máxima (Pmax)	280 bar
Número de dientes	11

Figura 8. Bomba de engranajes externos



✓ **Motor trifásico basculante**

Figura 9. Motor eléctrico basculante



Tabla 3. Información técnica motor eléctrico basculante [3]

Fabricante	<i>General Electric</i>
MOD	5K48NG626X
Factor de servicio SF	1.15
Tensión	230 V- 460 V
Intensidad de corriente	6.0 A / 3.0 A
SFA	6.6/3.3
FR (IP)	56
AMB	40 C
INS. CL	B
NEMA DSN	B
TIME RATING	CONT
Potencia	2.0 HP
Fases	3
Frecuencia	60 Hz
Velocidad rotación	3450 RPM
CODE	H

✓ **Depósito de aceite**

Tabla 4. Información depósito de aceite [3]

Material	acero
Accesorios	Filtro interno tipo malla metálica Nivel de vidrio
Capacidad	3 US Gal. (12 L)
Tipo de aceite	Shell TELLUS S2M 32
Viscosidad del aceite	32 cSt a 40 °C

Figura 10. Depósito de aceite



✓ **Celda de carga**

Tabla 5. Información técnica celda de carga [3]

Fabricante	<i>Omegadyne</i>
Modelo	LCFD-10 247924
Rango	(0 – 10) lb
Tensión de Excitación DC	5 V
Temperatura	(-54 a 121) °C (-65 a 250) °F
Sobrecarga segura	150 FS
Tornillo de fijación	#6-32 UNC
Longitud del cable	1,5 m

Figura 11. Celda de carga *Omegadyne*



✓ **Válvula reguladora de caudal**

Figura 12. Válvula reguladora de caudal



Tabla 6. Información técnica de la válvula [27]

Fabricante	<i>Parker</i>
Tipo	aguja
Referencia	PF400S
Rosca	1/4 in NPT
Fluido	Aceite o gases
Presión de trabajo	350 bar 5075 psi

✓ **Flujómetro**

Tabla 7. Información técnica flujómetro [3]

Fabricante	<i>Hedland</i>
Tipo	Área variable del tipo pistón
Referencia	E-Z
Rango de Caudal	(0.5 – 4) gal/min (2 – 15) L/min
Diámetro de entrada	1 in NPT
Diámetro de salida	1 in NPT
Fluido	Aceite
Presión máxima	325 psi
Temperatura máxima	60°C
Calibración estándar	SG = 0.876 para aceite 32 cSt viscosidad
Material	Polysulfone or Radel®

Figura 13. Flujómetro *Hedland*



✓ **Manómetro de descarga**

Tabla 8. Información técnica del manómetro

Fabricante	<i>Helbert</i>
Tipo	<i>Bourdon</i>
Rango	(0 – 2000) psi
Resolución	40 psi

Figura 14. Manómetro de *Bourdon*



1.1.2 Elementos eléctricos

✓ Variador de frecuencia

Figura 15. Variador de frecuencia



Tabla 9. Información técnica del variador de frecuencia [18]

Fabricante	<i>Lenze</i>
Modelo	ESMD222X2TXA
Potencia	2,2 kW
Input: 3/PE	
Tensión AC	230/240 V
Intensidad de corriente	11 A
Frecuencia	50/60 Hz
Output: 3/PE	
Tensión AC	(0-230)V
Intensidad de corriente	9,6 A
Frecuencia	0 – 240 Hz

✓ Contactor eléctrico

Figura 16. Contactor eléctrico

Tabla 10. Información técnica del contactor eléctrico [31]

Fabricante	<i>Schneider</i>
Modelo	LC1D09BD
Potencia	5,5 kW
Tensión AC	690 V
Intensidad de corriente	9 A
Número de polos	3
Frecuencia	50/60 Hz



2. DEFINICIÓN Y DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL Y SELECCIÓN DE SOFTWARE Y HARDWARE NUEVO

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El banco hidráulico que se encuentra en el Laboratorio de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica (UTP), permite obtener las curvas características (caudal contra presión, potencia de accionamiento contra presión y eficiencia contra presión) de una bomba rotoestática de desplazamiento positivo, operando a diferentes velocidades de rotación. Pero, el procedimiento para la obtención de los datos, involucra un manejo manual de algunos elementos, lo que conlleva, a faltas de exactitud en los resultados.

Previo a la ejecución del presente proyecto, para obtener las curvas de desempeño de la bomba, se seguía el procedimiento descrito a continuación:

Inicialmente se elegía una velocidad de rotación para la bomba. Como, para cada curva de operación se debe garantizar un valor de velocidad de rotación constante, ésta se fijaba por medio del variador de frecuencia que acciona el motor eléctrico. En el desarrollo de la práctica de laboratorio se manipula la válvula reguladora de caudal, y al mismo tiempo que se varía el caudal, se modifican los valores en la presión de descarga de la bomba. A medida que se incrementa la presión, también se incrementa la potencia de accionamiento y esto genera que el motor disminuya su velocidad de rotación y por ende la velocidad de la bomba. Como ya se explicó anteriormente, la velocidad de rotación debe ser constante, y para esto se hacía necesario ajustar la frecuencia del motor (incrementándola en este caso), siendo obligatorio que 4 personas interactuaran en el proceso, una variando la presión, la otra midiendo la velocidad de rotación con un cuenta-revoluciones, la otra girando la perilla del potenciómetro para cambiar el valor de la frecuencia del variador y otra registrando manualmente los datos. Esto hacía que la operación fuera algo complicada y presentaba problemas de exactitud y precisión.

2.2 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Debido a la problemática mencionada anteriormente, se planteó una solución consistente en automatizar el proceso de fijación de la velocidad de rotación, prefijando el valor requerido, de tal forma que al registrarse un cambio, de manera automática el variador aumente o disminuya su frecuencia garantizando un valor constante de la velocidad de rotación.

Como el Banco hidráulico en el que se desarrolla el trabajo es usado para actividades de tipo académico, y con la finalidad de que el estudiante tenga contacto con la manipulación

del equipo, se decidió que la variación de la presión se hiciera de forma manual mediante la estrangulación de la válvula de flujo.

Para dar solución al diseño del sistema de control para el banco de pruebas de la bomba de desplazamiento positivo, es primordial, identificar las variables involucradas en el proceso. En la tabla 8 se muestra una clasificación de estas variables, según se puedan ajustar, medir, calcular y controlar.

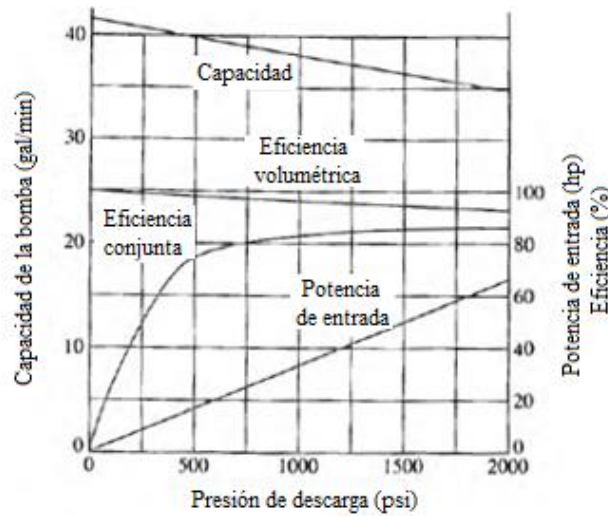
Tabla 11. Variables involucradas en el proceso

Variables a ajustar	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Velocidad de Rotación (N) ✓ Presión (P)
Variables a medir	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Velocidad de Rotación (N) ✓ Caudal (Q) ✓ Fuerza (F)
Variables a calcular	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Torque (T) ✓ Potencia del fluido (WkW) ✓ Potencia de accionamiento (BkW) ✓ Eficiencia de la bomba (η)
Variables a controlar	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Velocidad de Rotación (N)

Igualmente se debe analizar la información medida para obtener las curvas características de las bombas de desplazamiento positivo rotoestáticas: curva de caudal contra presión (Q~P), potencia de accionamiento contra presión (BkW~P) y eficiencia contra presión (η ~P).

En la figura 17 se pueden observar las curvas teóricas de una bomba de desplazamiento positivo tipo rotoestática, ya mencionadas, más la curva de eficiencia volumétrica contra presión.

Figura 17. Curvas características de una bomba de desplazamiento positivo rotoestática

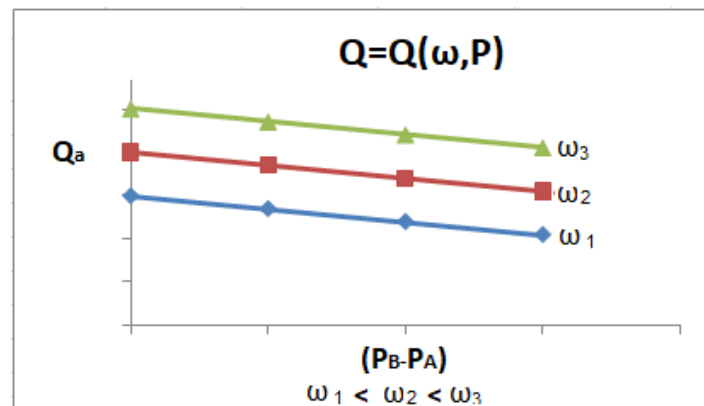


Tomada de: Mecánica de Fluidos de *Mott* [23]

Sabiendo que el torque y la velocidad, así como el flujo y la presión, son las variables de mayor interés en las máquinas de desplazamiento positivo, se hace necesario realizar un análisis de lo que ocurre en la bomba a partir de dichas variables.

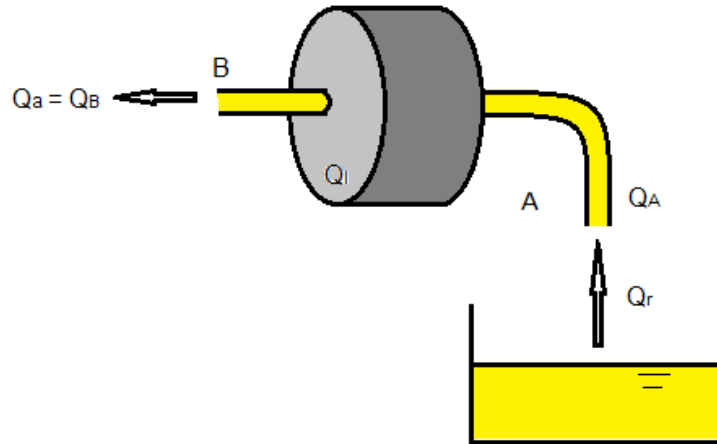
2.2.1. Análisis para el caudal. Las bombas rotativas de desplazamiento positivo proporcionan un caudal prácticamente constante a una velocidad de rotación fija, independientemente de los cambios en la presión la descarga. La figura 18 muestra el comportamiento de una bomba de desplazamiento positivo operando a tres velocidades angulares diferentes. Aquí se puede observar, que a medida que la velocidad angular es mayor, el caudal entregado por la bomba también es mayor.

Figura 18. Curvas características de $Q \sim P$ a diferentes velocidades angulares



Buscando obtener una expresión que describa el comportamiento del caudal, se hace el siguiente análisis matemático:

Figura 19. Esquema de caudales en una BDP rotativa



Planteando ecuación de continuidad entre la entrada y la salida del fluido a la bomba, figura 19, se tiene:

$$\frac{dm}{dt} + \dot{m}_B - \dot{m}_A = 0 \quad (2.1)$$

Donde, $\frac{dm}{dt}$ es el cambio de la masa en el tiempo;

\dot{m}_B Flujo másico del fluido (aceite) a la salida de la bomba, $\dot{m}_B = \rho_B Q_B$;

\dot{m}_A Flujo másico del fluido (aceite) a la entrada de la bomba, $\dot{m}_A = \rho_A Q_A$;

Sabiendo que flujo másico es igual al producto de la densidad del fluido por el caudal, y que el caudal de salida de la bomba (Q_B) será el mismo caudal real (Q_a), es decir $Q_B = Q_a$, la expresión (2.1) tiene la forma:

$$\frac{dm}{dt} + \rho_B Q_a - \rho_A Q_A = 0 \quad (2.2)$$

Ahora, considerando que el fluido es incompresible

$$\rho_A = \rho_B = \rho = \text{constante}$$

$$\frac{dm}{dt} + \rho Q_a - \rho Q_A = 0$$

Ya que el flujo másico expresa la variación de la masa con respecto al tiempo en un área específica, éste se puede escribir también como $\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt}$; quedando la fórmula anterior como:

$$\rho \frac{dV}{dt} + \rho Q_a - \rho Q_A = 0$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_A - Q_a \quad (2.3)$$

El caudal de fluido que ingresa a la bomba (Q_A), es en realidad la suma de diferentes caudales

$$Q_A = Q_t - Q_l - Q_r \quad (2.4)$$

Donde, Q_t es el caudal teórico de la bomba, cuando es en función de las dimensiones físicas y de la velocidad del eje (se asume como cero las pérdidas y la cavitación);

Q_l es el caudal perdido por viscosidad, proporcional a la diferencia de presión entre la entrada y la salida;

Q_r pérdidas debidas a la entrada de gases o vapor;

Al reemplazar la expresión (2.4) en (2.3) y despejando el caudal real, se obtiene la fórmula (2.5)

$$Q_a = Q_t - Q_l - Q_r - \frac{dV}{dt} \quad (2.5)$$

➤ Teniendo presente que en la realidad todos los líquidos se comprimen un poco, se debe tener en cuenta el módulo de compresibilidad (β) del fluido en este análisis.

$$\beta = -\frac{dP}{dV/V} = \frac{dP}{d\rho/\rho}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{\beta}$$

Integrando entre el punto de entrada y de salida de la bomba, se puede obtener una expresión para la densidad del fluido de salida:

$$\ln \rho|_A^B = \int_A^B \frac{dP}{\beta}$$

$$\rho_B = \rho_A e^{\frac{P_B - P_A}{\beta}} = \rho_A \left(1 + \frac{P_B - P_A}{\beta} \right)$$

Reemplazando ρ_B y (2.4) en la fórmula (2.2), se tiene:

$$\frac{dm}{dt} + \rho_A \left(1 + \frac{P_B - P_A}{\beta} \right) Q_a - \rho_A (Q_t - Q_l - Q_r) = 0$$

$$\frac{1}{\rho_A} \frac{dm}{dt} = (Q_t - Q_l - Q_r) - \left(1 + \frac{P_B - P_A}{\beta} \right) Q_a$$

Ahora, considerando que el flujo de fluido es permanente y despejando Q_a , se obtiene:

$$Q_a = Q_t - Q_l - Q_r - \left(\frac{P_B - P_A}{\beta} \right) Q_t \quad (2.6)$$

- Según Watton en su libro “*Fluid Power Systems*” [35], el caudal teórico para una bomba de desplazamiento positivo de tipo rotativo, es resultado del desplazamiento (D)

$$D = \frac{dV_o}{d\theta} \quad (2.7)$$

Donde, V_o volumen desplazado
D es el área efectiva
 θ Es la rotación angular total

Y teniendo en cuenta el cambio en el tiempo

$$D = \frac{\frac{dV_o}{dt}}{\frac{d\theta}{dt}} = \frac{Q_t}{\omega}$$

Entonces, el caudal teórico quedará expresado de la siguiente forma:

$$Q_t = D\omega \quad (2.8)$$

- Como Q_l es proporcional a la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la bomba, se puede escribir como:

$$Q_l = k_l(P_B - P_A) \quad (2.9)$$

donde, k_l Es la constante de pérdida por viscosidad.

De acuerdo con los planteamientos de Blackburn, Reethof y Shearer, en el libro “Fluid Power Control” [5], para definir esta constante de pérdida es necesario incluir un coeficiente de deslizamiento, C_s

$$k_l = C_s \frac{2\pi D}{\mu} \quad (2.10)$$

Por último, reemplazando las expresiones (2.8) y (2.9) en (2.6), se obtiene:

$$Q_a = D\omega - k_l(P_B - P_A) - \left(\frac{P_B - P_A}{\beta}\right) D\omega - Q_r$$

$$Q_a = D\omega - \left(k_l + \frac{D\omega}{\beta}\right) (P_B - P_A) - Q_r$$

$$K_l' = f(\omega)$$

Teniendo en cuenta el desarrollo matemático realizado, la fórmula de caudal real para una bomba de desplazamiento positivo rotativa queda expresada como se muestra en la ecuación 2.11.

$$Q_a = D\omega - K_l'(P_B - P_A) - Q_r \quad (2.11)$$

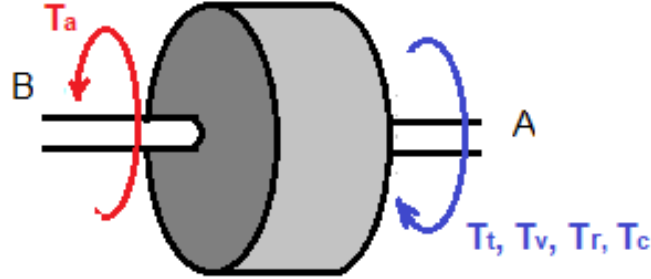
Cómo K_l' y D , son constantes se reemplazan por la notación K_1 y K_2 respectivamente

$$Q_a = K_2\omega - K_1(P_B - P_A) - Q_r \quad (2.12)$$

2.2.2. Análisis para el torque: A partir del análisis anterior, será posible obtener la curva de potencia de accionamiento contra presión. En una bomba de desplazamiento positivo

que trabaja a velocidad constante, planteando la ecuación de cantidad de movimiento, para la figura 20, se tiene:

Figura 20. Esquema de torques para una BDP rotativa



$$\sum F = m \frac{dv}{dt} \quad (2.13)$$

$$F_a - F_v - F_r - F_c - F_t = m \frac{dv}{dt}$$

$$T_a - T_v - T_r - T_c - T_t = J_o \frac{d\omega}{dt} \quad (2.14)$$

Donde, $\frac{d\omega}{dt}$ es el cambio de la velocidad angular en el tiempo;
 J_o es el momento polar de inercia respecto al eje de rotación;
 T_a es el torque “actual” o real;
 T_v es el torque generado por la fuerza viscosa (depende de la velocidad angular),
 $T_v = B_v \omega$;
 T_r Torque debido a la fricción mecánica, $T_r = B_r (P_B - P_A)$;
 T_c es el torque independiente de la velocidad de presión;
 T_t es el torque teórico;

- ✓ La potencia entregada por la bomba o potencia hidráulica depende del fluido que se esté bombeando, de la altura a la que se esté trabajando y de la cantidad de fluido que se esté manejando. Esta potencia se puede expresar así:

$$\dot{W}_{hidráulica} = \gamma QH = PQ = Q(P_B - P_A) \quad (2.15)$$

Donde, γ es el peso específico del fluido;

Q es la cantidad de fluido entregado o caudal entregado (Q_a)
 H es la cabeza de operación de la bomba
 P_A es la presión a la entrada de la bomba (Presión atmosférica)
 P_B es la presión a la salida de la bomba

Sabiendo que:

$$\dot{W} = F_t v = T_t \omega$$

Donde, F_t es fuerza total
 v es velocidad lineal
 T_t es Torque total

Por consiguiente:

$$T_t \omega = Q_a (P_B - P_A)$$

Entonces,

$$Q_l = 0, \quad Q_r = 0 \quad \text{y} \quad \frac{dV}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad Q_a = Q_t = D\omega$$

$$\frac{T_t \omega}{\omega} = \frac{Q_a}{\omega} (P_B - P_A)$$

$$T_t = D(P_B - P_A) \tag{2.16}$$

Reemplazando las expresiones de cada torque en la fórmula (2.14), se obtiene:

$$T_a - B_v \omega - B_r (P_B - P_A) - T_c - D(P_B - P_A) = J_o \frac{d\omega}{dt}$$

Llegando finalmente a la fórmula de torque para una bomba de desplazamiento positivo rotativa, en estado transitorio:

$$T_a - B_v \omega - (B_r + D)(P_B - P_A) - T_c = J_o \frac{d\omega}{dt} \quad (2.17)$$

2.2.3. Eficiencia de la bomba

$$\eta_{bomba} = \frac{\dot{W}_{hidráulica}}{\dot{W}_{accionamiento}} \quad (2.18)$$

Donde:

- La potencia de entrada a la bomba o potencia de accionamiento, se expresa como:

$$\dot{W}_{accionamiento} = T\omega = Fd\omega \quad (2.19)$$

Como d es constante (K_3) e igual al brazo que genera el torque (para el caso del motor del banco hidráulico $d=0,16$ m), queda:

$$\dot{W}_{accionamiento} = K_3 F \omega$$

- La potencia hidráulica quedó expresada en la fórmula (2.15)

De las expresiones 2.15, 2.18 y 2.19 se observa que:

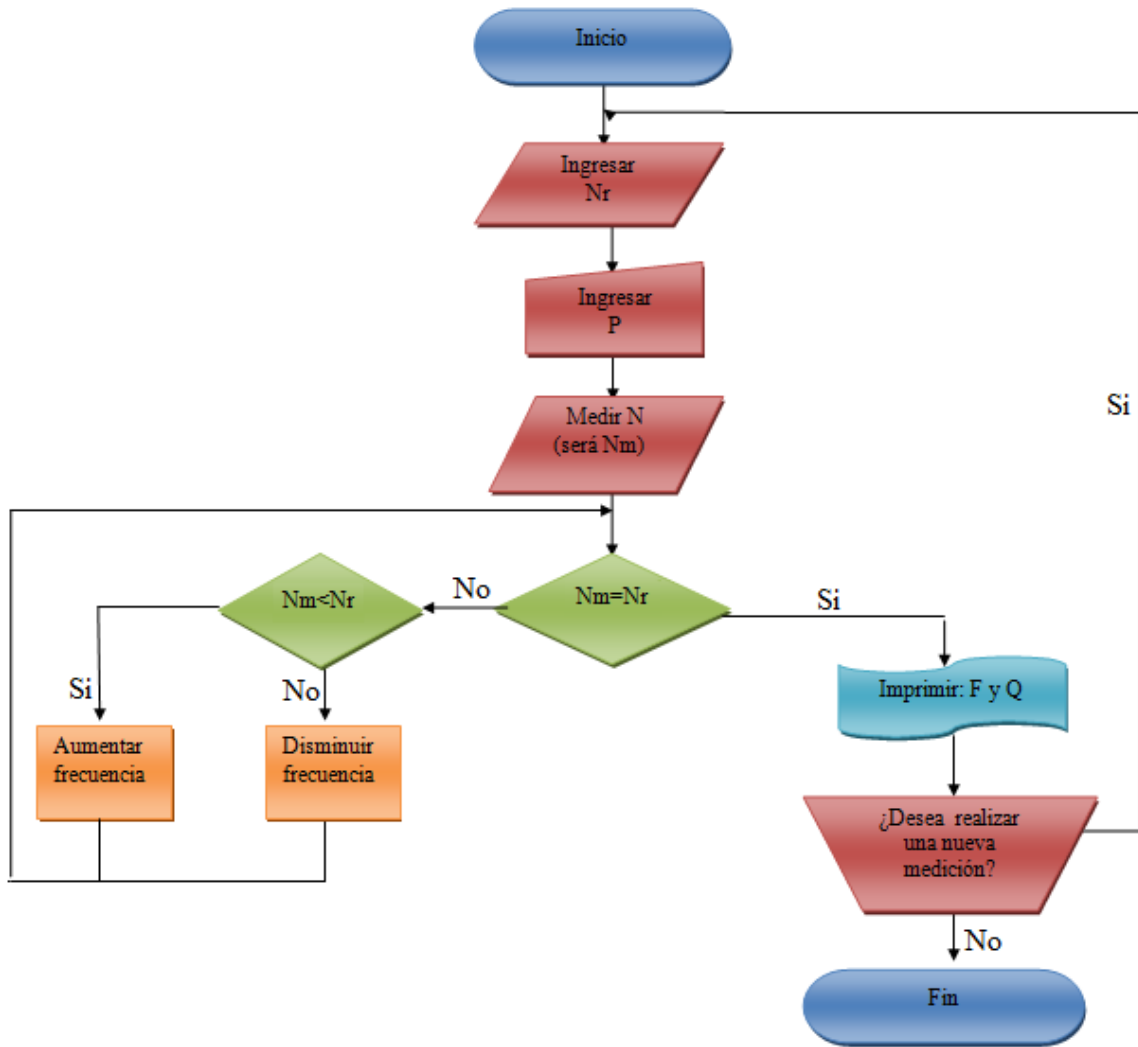
- ✓ La potencia de entrada ($\dot{W}_{accionamiento}$) es función del momento torsor (T) y de la velocidad angular del eje de la bomba (ω)
- ✓ La potencia entregada por la bomba ($\dot{W}_{hidráulica}$) es función de la presión diferencial de la bomba ($P_B - P_A$) del caudal a la salida y del flujo efectivo a la salida medido a la presión más alta.
- ✓ La eficiencia global es función de la potencia de entrada ($\dot{W}_{accionamiento}$) y potencia de salida de la bomba ($\dot{W}_{hidráulica}$)

Por lo tanto, las variables a medir son las siguientes:

- Velocidad de rotación del eje de la bomba
- Presión a la salida de la bomba (tomando como presión de entrada a la bomba la presión atmosférica)
- Caudal a la salida de la bomba

2.2.4. Diagrama de flujo. Las expresiones obtenidas a partir del desarrollo matemático, son herramientas que permiten definir las variables a tener en cuenta en la programación del sistema de control pensado para la solución del problema. Ya con las expresiones matemáticas y con las variables definidas (tabla 11), se trabaja en la metodología a seguir, para los cálculos y obtención de las curvas características deseadas de la bomba de desplazamiento positivo. El diagrama de flujo de la figura 21 permite observar el paso a paso a seguir.

Figura 21. Diagrama de flujo del proceso de funcionamiento del banco hidráulico de la BDP



Descripción de los pasos del diagrama de flujo de la figura 21:

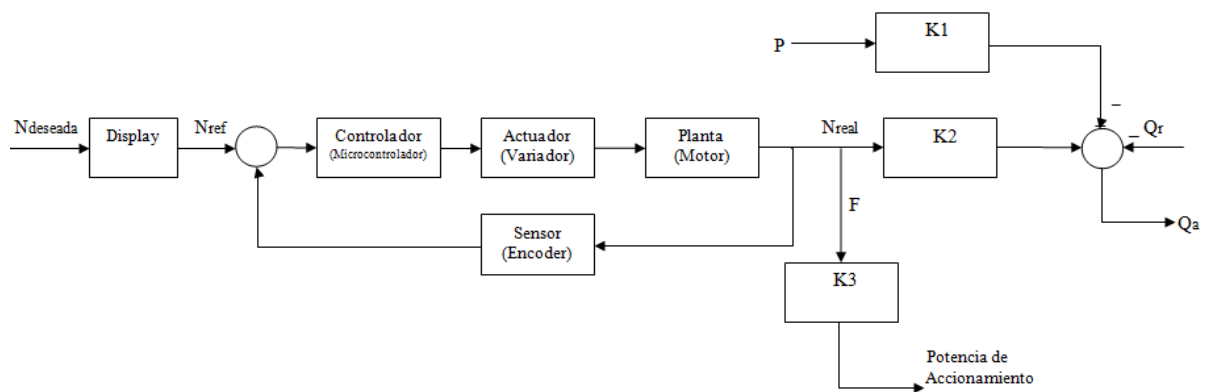
- a. Definir el valor de la velocidad de rotación de referencia (N_r) y registrarla como el “*set point*”
- b. Ajustar manualmente la presión (P) a la que operará el sistema, estrangulando la válvula de regulación de caudal.
- c. Medir la velocidad de rotación (N_m), esto debido a que el valor varía con el cambio de presión. En caso de que ésta velocidad sea diferente a la velocidad de referencia, el sistema de control hace la corrección mediante la modificación de la frecuencia del

variador; y si es igual, se registran los valores de caudal y fuerza para ese punto de operación.

Si se desea realizar una nueva medición, el ciclo se repite cuantas veces se considere necesario.

2.2.5. Diagrama de bloques del sistema de control. El diagrama del sistema es mostrado en la figura 22. Presenta los diferentes elementos que componen el banco de pruebas, los medidores requeridos, la información obtenida del modelo matemático, así como los elementos a controlar.

Figura 22. Diagrama de bloques para el banco de pruebas de una bomba de desplazamiento positivo



Nota: K_1 , K_2 y K_3 son constantes que se definen en el desarrollo matemático.

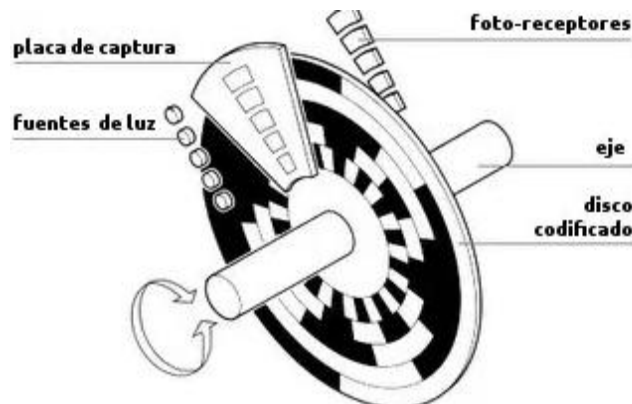
2.3. SELECCIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE REQUERIDO POR EL BANCO HIDRÁULICO

En la tabla 11 se dividieron las variables entre las que se deseaban ajustar, medir, calcular y controlar. Aquellas que requieren medición son: Velocidad de rotación (N), Caudal (Q), Presión (P) y Fuerza (F). De estas 4, sólo la velocidad de rotación y el caudal, requieren elementos nuevos para sensar la señal, puesto que, para la medición de la presión se seguirá utilizando el manómetro de Bourdon del banco hidráulico original y para la fuerza se utilizará la celda de carga con la que se ha trabajado con anterioridad; pero ahora, la señal se llevará al sistema de adquisición para mostrar el valor en la interfaz gráfica.

2.3.1. Encoder Incremental. Para poder determinar la velocidad de giro del motor, es necesario un elemento que tome la señal y que a su vez permita llevarla a un microcontrolador programado para entregar los valores medidos por medio de una interfaz; esto lo hace perfectamente un encoder.

Un encoder se compone básicamente de un disco ranurado (figura 23) conectado a un eje giratorio. El disco está hecho de vidrio o plástico y se encuentra “codificado” con unas partes transparentes y otras opacas que bloquean el paso de la luz emitida por la fuente de luz (típicamente emisores infrarrojos). En la mayoría de los casos, estas áreas bloqueadas (codificadas) están ubicadas en forma radial. A medida que el eje rota, el emisor infrarrojo emite luz que es recibida por el sensor óptico (o foto-transistor) generando los pulsos digitales a medida que la luz cruza a través del disco o es bloqueada en diferentes secciones de este. Esto produce una secuencia que puede ser usada para medir el ángulo de giro, la dirección del movimiento e incluso la velocidad [16].

Figura 23. Disco codificado de un encoder



Tomado de: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/encoder/> [16]

Existen diferentes tipos de encoders: el óptico, el incremental, el lineal, el absoluto y el de cuadratura. Para este trabajo, se requería un encoder que permitiera medir la velocidad de rotación del eje motor-bomba, por lo que se eligió un encoder incremental que se podía acoplar fácilmente a dicho eje y que determina el ángulo de gira contando los pulsos eléctricos por el microcontrolador. La figura 24 muestra la imagen del encoder utilizado en el montaje del sistema de control y la información técnica se encuentra en la tabla 12.

Tabla 12. Información técnica del encoder **Figura 24.** Encoder Incremental [16]

Encoder	
tipo	Rotativo incremental
Modelo	
Señal	600 pulsos/revolución
Tensión en CD	5 V a 24 V
Intensidad de corriente	30 mA
Máx. velocidad	500 rev/ min
Carga máx. radial	10 N
Carga máx. axial	5 N
Respuesta de frecuencia eléctrica	20 kg/s
Longitud cable	1,5 m
Temperatura	(-40 a 85) °C
Diámetro eje	6 mm
Cable:	
Verde	Fase A
Blanco	Fase B
Rojo	Alimentación
Negro	GND



2.3.2. Sensor de flujo. Para tomar la señal de caudal se eligió un sensor de efecto hall metálico, mostrado en la figura 26. Este sensor es el que presenta mejores características a las demandas del banco hidráulico, puesto que el fluido de trabajo es aceite y los otros sensores presentar restricciones en cuanto a la viscosidad del fluido; la información de este sensor se presenta en la tabla 13 y el esquema en la figura 25.

El sensor funciona por medio de una hélice que gira con el flujo de fluido, y por medio de un sensor de efecto hall se detecta cada vez que la turbina completa un giro. Entrega como salida un pulso de onda cuadrada que varía en forma directa y proporcional al flujo que atraviesa el sensor [33].

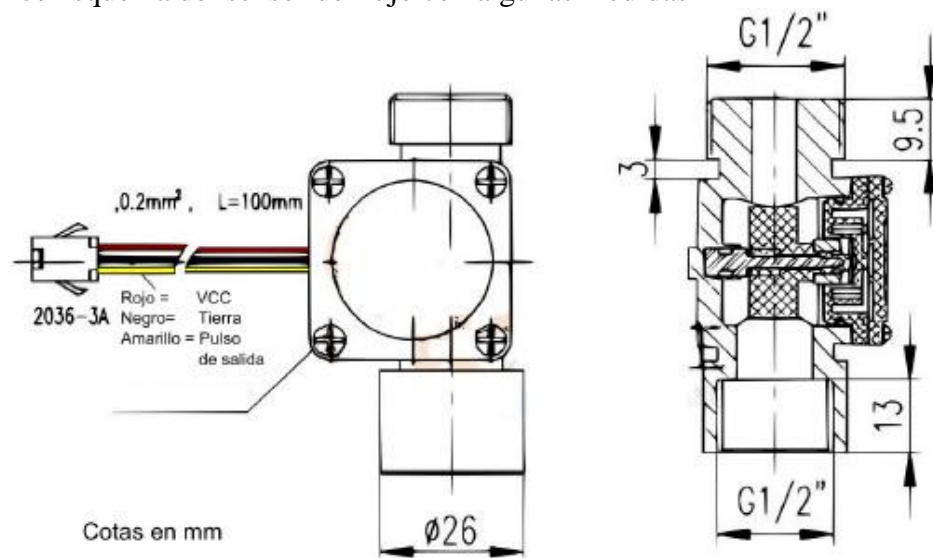
- ✓ Aproximación matemática dada por el distribuidor del sensor [33]:

$$F = 8,1 Q - 3 \quad (2.20)$$

(error aproximado del 2%)

Donde: F es el flujo;
Q es el caudal en L/min

Figura 25. Esquema del sensor de flujo con algunas medidas



Tomado de: <https://www.vistronica.com/content/category/como-comprar> [33]

Figura 26. Sensor de flujo



Tabla 13. Información técnica del sensor de flujo [33]

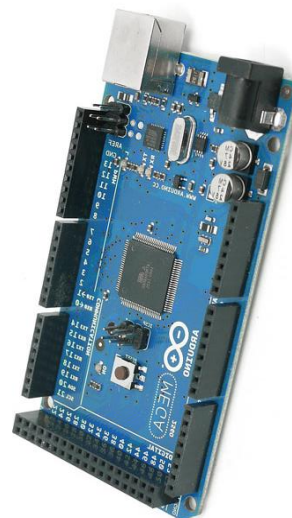
Sensor de Flujo	
tipo	Por efecto Hall
Modelo	
Rango	(1 – 30) L/min
Resolución	1,5 L/min
Tensión en CD	5 V
Intensidad de corriente máx.	10 A
Temperatura máx	80 °C
Presión máx.	1,75 MPa
Diámetro de rosca	½ pulg
Material	Cobre

2.3.3. Microcontrolador. Como elemento para capturar la señal de los sensores y enviarla a los actuadores, se eligió un Arduino MEGA 2560, figura 27. Este será el elemento de interacción entre el hardware y el software. El propósito fundamental de los microcontroladores es el de leer y ejecutar el programa escrito, el cual se elaboró en *Processing Development Enviroment PDE* [10]. La información técnica del Arduino MEGA 2560 se presenta en la tabla 13.

Tabla 14. Información técnica del microcontrolador

Arduino	
tipo	MEGA 2560
Microcontrolador	ATmega2560
Tensión Operativa	5 V
Tensión de entrada	(7 – 12) V
Tensión de entrada (limite)	(6 – 20) V
Pines digitales de Entrada/salida	54 (14 con salida PWM)
Pines análogos de entrada	16
Corriente DC por cada pin entrada/salida	40 mA
Corriente DC entregada en el pin 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	256 KB (8 KB bootloader)
SRAM	8KB
EEPROM	4 KB
Clock speed	16 Hz

Figura 27. Microcontrolador - Arduino MEGA 2560



Tomado de: <https://www.electrontools.com/Home/WP/2018/06/19/arduino-mega-2560-caracteristicas/> [10]

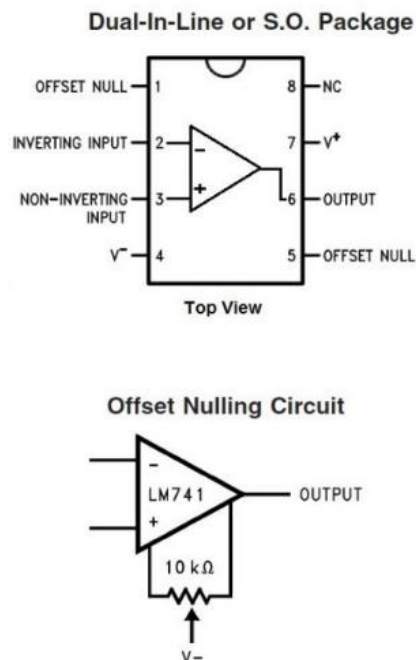
2.3.4. Amplificador operacional. El LM741 es un amplificador operacional que ofrece muchas características (tabla 15) que hacen que su aplicación sea casi a prueba de protección de sobrecarga en la entrada y la salida, ausencia de enclavamiento cuando se excede el rango de modo común y libre de oscilaciones. El amplificador fue usado para elevar la tensión del sensor de flujo (de 5 V a 10 V) para que el microcontrolador la pudiera

detectar. En la figura 28 se presenta el diagrama electrónico del amplificador operacional LM741.

Tabla 15. Información técnica del amplificador operacional [6]

Amplificador operacional	
tipo	LM741
Tensión de alimentación mín	10 V
Tensión de alimentación máx	44 V
Ancho de banda	1,5 MHz
Velocidad de cambio	0,5 V/ μ s
Temperatura de funcionamiento mín	0 °C
Temperatura de funcionamiento máx	70 °C
Encapsulado	DIP
pinos	8

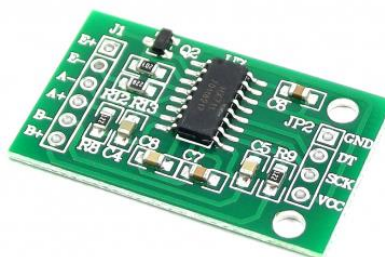
Figura 28. Diagrama electrónico del amplificador operacional



2.3.5. Transmisor de celda de carga. El módulo HX711, figura 29, es una interfaz entre las celdas de carga y un microcontrolador como Arduino, permitiendo leer el peso en la celda de manera sencilla. Las celdas de carga están formadas por galgas extensiométricas en configuración de puente *Wheatstone* [25].

Para conectar la celda al módulo HX711 son necesarios 4 cables (rojo, negro, blanco y verde). En la tabla 16 se puede observar que el cable rojo y el negro son los conductores de potencia y el verde y el blanco son los que entregan la señal proporcional.

Figura 29. Transmisor de celda de carga HX711



Tomado de: naylampmechatronics.com/sensores/147-modulo-hx711-transmisor-de-celda-de-carga.html [25]

Tabla 16. Información técnica Transmisor de celda de carga HX711 [25]

Transmisor celda de carga	
tipo	HX711
Tensión de operación en DC	5 V
Tensión de entrada diferencial	± 40 mV
Resolución de conversión A/D	24 bit
Frecuencia de lectura	80 Hz
Compatible con celdas de carga	5 kg, 20 kg, 50 kg
Señal según color:	
Tensión de excitación +, E+, VCC	Rojo
Tensión de excitación -, E-, GND	Negro
Amplificador +, Señal +, A+	Blanco
Amplificador -, Señal -, A-	Verde

2.4. PROGRAMACIÓN E INTERFAZ GRÁFICA

Después de la selección de los elementos sigue la etapa de programación y elaboración de la *intefaz gráfica del usuario* (GUI) de *LabVIEW*® [24]. La programación del microcontrolador se hizo en *Processing Development Enviroment* (PDE) [28] un lenguaje propio del arduino, pero para esto, primero fue necesario caracterizar dos elementos: el sensor de flujo y la celda de carga.

2.4.1 Caracterización de la celda de carga. La celda de carga es la misma que se venía utilizando en el banco original. Para las prácticas que se realizaban antes del diseño del sistema de adquisición de datos, la celda se conectaba a un indicador con pantalla donde se observaba el valor generado por la fuerza transmitida a través del brazo del motor basculante. Después de hacer el diseño del sistema de control, la fuerza se transmite de la misma forma, lo que cambia ahora, es que el valor de fuerza generada se visualiza en la interfaz gráfica.

Para determinar la curva característica de la celda y garantizar confiabilidad en las mediciones, ésta se calibró utilizando masas conocidas. Estas masas se colocaron sobre la celda tal y como se muestra en las figuras 30 y 31. Se tomaron los valores registrados en el display del indicador (valor fuerza celda) y se compararon con los valores calculados a partir de la masa (Valor fuerza real); los resultados de la calibración se pueden observar en la tabla 17.

Figura 30. Celda con una masa patrón de 52,2 g.



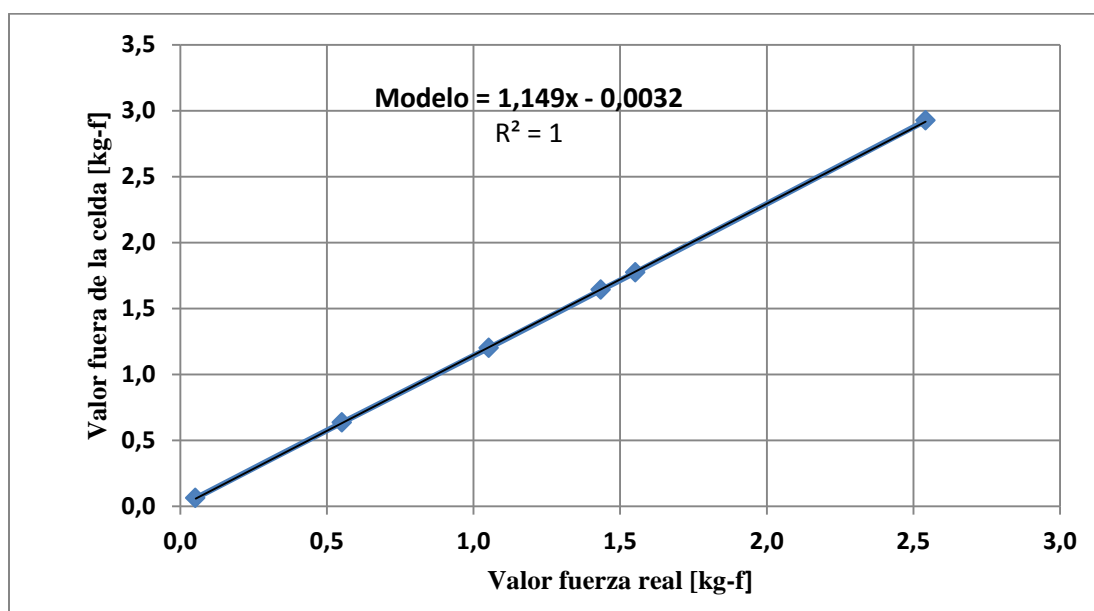
Figura 31. Celda con una masa patrón de 552,2 g.



Tabla 17. Valores obtenidos para la caracterización de la celda de carga

masa [g]	Valor fuerza celda [kg-f]	Valor fuerza real [kg-f]
52,2	0,061	0,052
552,2	0,635	0,552
1052,2	1,201	1,052
1434,9	1,641	1,435
1552,2	1,774	1,552
2542,2	2,925	2,542

Figura 32. Caracterización de la celda de carga



Tal y como se observa en la figura 32, existe una correlación lineal, cuya expresión es:

$$\text{Fuerza Celda} = 1,149 \text{ Fuerza Real} - 0,003 \quad (2.21)$$

La relación hallada indica que en el código de la programación, la tensión se debe multiplicar por una constante K_4 , la cual será el inverso de 1,149; de esta forma el valor de la fuerza será el valor correcto (valor real de la fuerza). En el capítulo 4, los valores de las fuerzas tomadas en las pruebas realizadas, muestran la desviación estándar de cada

medición y se registraron en las tablas de cada velocidad de rotación a la que opera la bomba.

2.4.2 Caracterización del sensor de flujo. En la programación del microcontrolador, la aproximación matemática hecha por el distribuidor del sensor fue tomada en cuenta, no obstante, se realizó una comparación entre el valor que se lee en el flujómetro, con el valor registrado en la interfaz gráfica para el sensor de flujo. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 18 y 19, para las velocidades de rotación de 1800 rpm y 2000 rpm respectivamente.

Tabla 18. Valores obtenidos para la caracterización del sensor de flujo a una velocidad de rotación de 1800 rpm

P [psi]	Q Flujómetro [L/min]	Q Sensor [L/min]	N [rpm]
50	8,8	9,0	1800
100	7,8	8,0	
200	6,8	6,5	
320	5,0	4,0	
440	3,3	2,2	

Figura 33. Caracterización del sensor de flujo N=1800 rpm

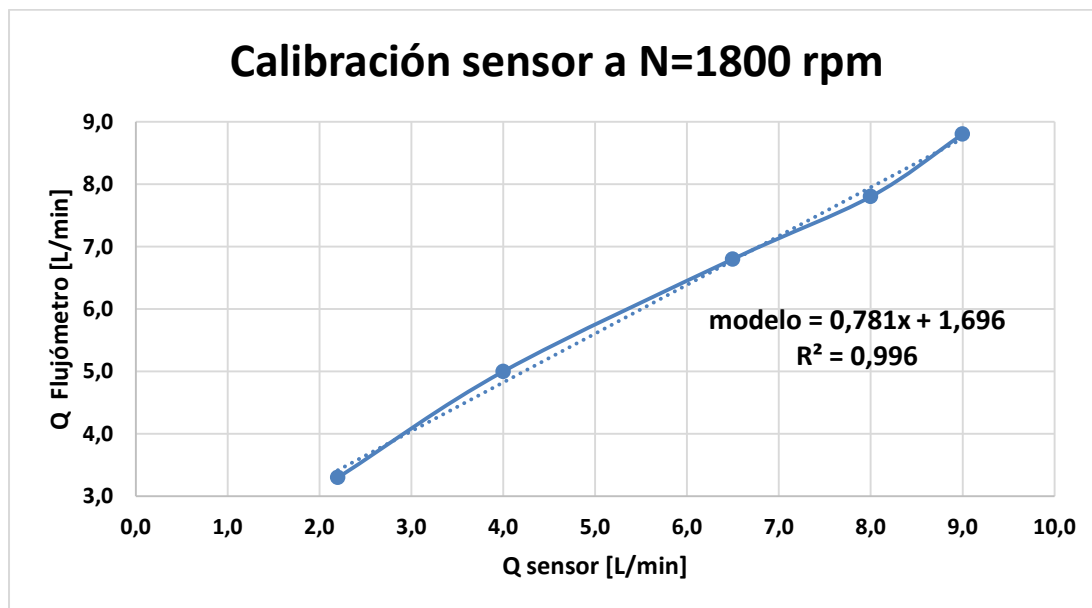
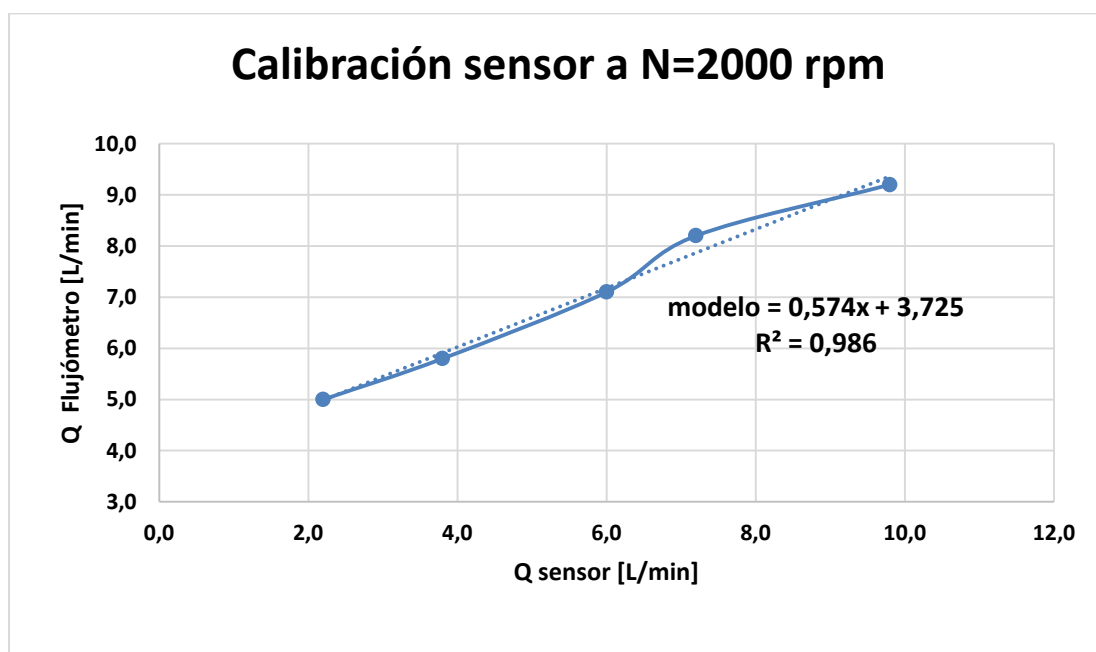


Tabla 19. Valores obtenidos para la caracterización del sensor de flujo a una velocidad de rotación de 2000 rpm

P [psi]	Q Flujómetro [L/min]	Q Sensor [L/min]	N [rpm]
50	9,2	9,8	2000
100	8,2	7,2	
200	7,1	6,0	
320	5,5	3,8	
440	4,7	2,2	

Figura 34. Caracterización del sensor de flujo N=2000 rpm



Las figuras 33 y 34 permiten ver el comportamiento gráfico que se presenta al relacionar las mediciones del sensor de flujo y del flujómetro; a dos velocidades de operación de la bomba de desplazamiento positivo. Estos resultados presentan una relación de tipo lineal, arrojando las siguientes expresiones:

- ✓ Para una velocidad de rotación de 1800 rpm:

$$\text{Caudal del Flujómetro} = 0,781 \text{ Caudal del Sensor} + 1,696 \quad (2.22)$$

- ✓ Para una velocidad de rotación de 2000 rpm:

$$\text{Caudal del Flujómetro} = 0,574 \text{ Caudal del Sensor} + 3,725 \quad (2.23)$$

Para la caracterización del sensor de flujo y el valor de la constante de corrección (K_5) en el código de programación, se promediaron los dos valores de pendiente obtenidos. A partir de las expresiones (2.22) y (2.23). La constante K_5 tendrá un valor de 0,7.

Para los valores de caudal tomados con el sistema de adquisición y mediante el software Minitab ® [22], se calcularon las desviaciones estándar de cada dato para las velocidades de rotación elegidas en la caracterización de la bomba de desplazamiento positivo. Estas desviaciones se presentan en las tablas de toma de datos del capítulo 4.

Normalmente los instrumentos de medición se deben de elegir para que operen en más o menos los dos cuartos medios de su rango, es decir, no se recomienda que sean usadas en las proximidades del inicio del rango, ni del final de éste, debido a las no linealidades y a la zona muerta. Ogata en su libro *Ingeniería de control moderno* [26] se refiere a esto diciendo: “Por ejemplo, la salida de un componente puede saturarse para señales de entrada grandes. Puede haber una zona muerta que afecte a las señales pequeñas. (La zona muerta de un componente es un rango pequeño de variaciones de entrada a las cuales el componente es insensible)”. En el capítulo 4 puede verse que para valores de presión y caudal bajos, los datos tomados indican un comportamiento no lineal.

2.4.3 Elaboración del Instrumento Virtual Server (VIs) en LabVIEW [18]. Aprovechando el conjunto de funciones de VI server, que permite controlar dinámicamente los objetos del panel frontal, se logra obtener el sistema de control de velocidad de rotación para la bomba de desplazamiento positivo y diseñar la interfaz gráfica. El diagrama de bloques del sistema de control se muestra de forma simplificada en la figura 35, ya en los anexos se podrá encontrar extendido y en la figura 36 se puede observar la interfaz gráfica.

Figura 35. Diagrama de bloques simplificado del sistema de control para un banco de pruebas de una bomba de desplazamiento positivo (BDP)

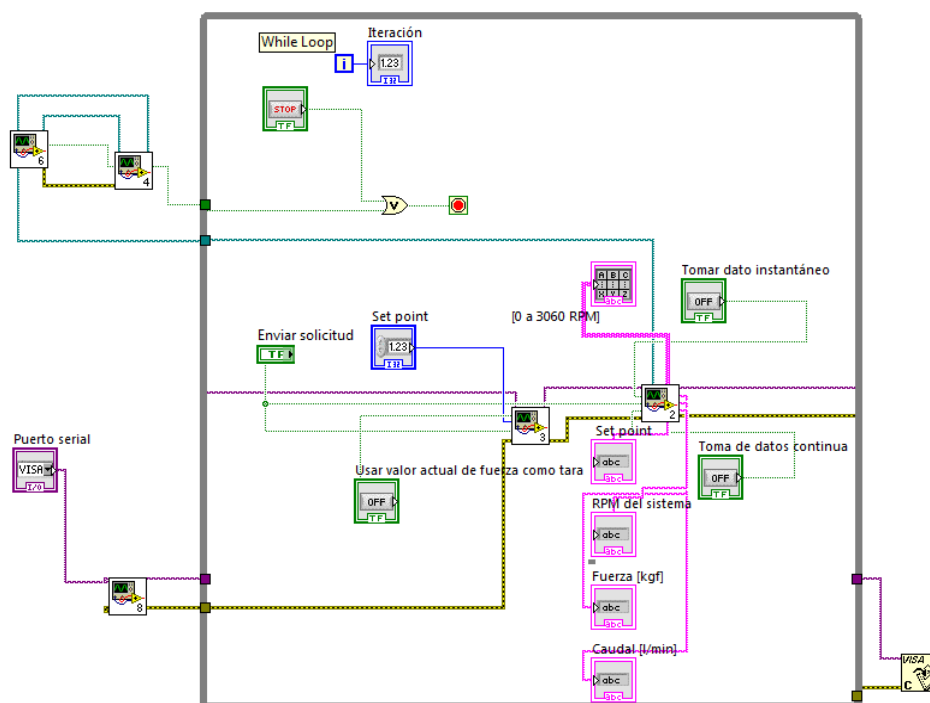
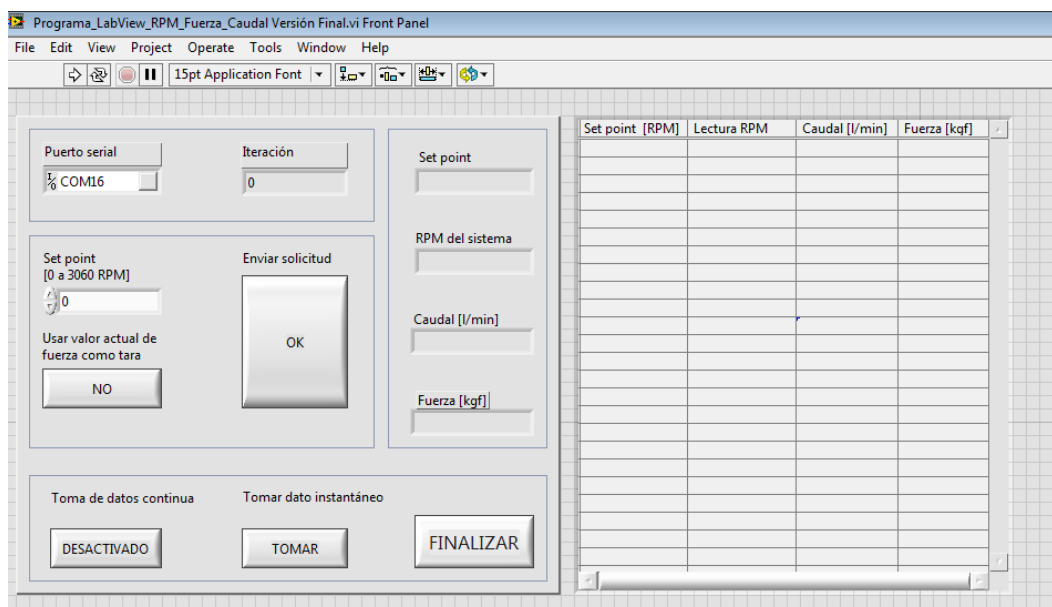
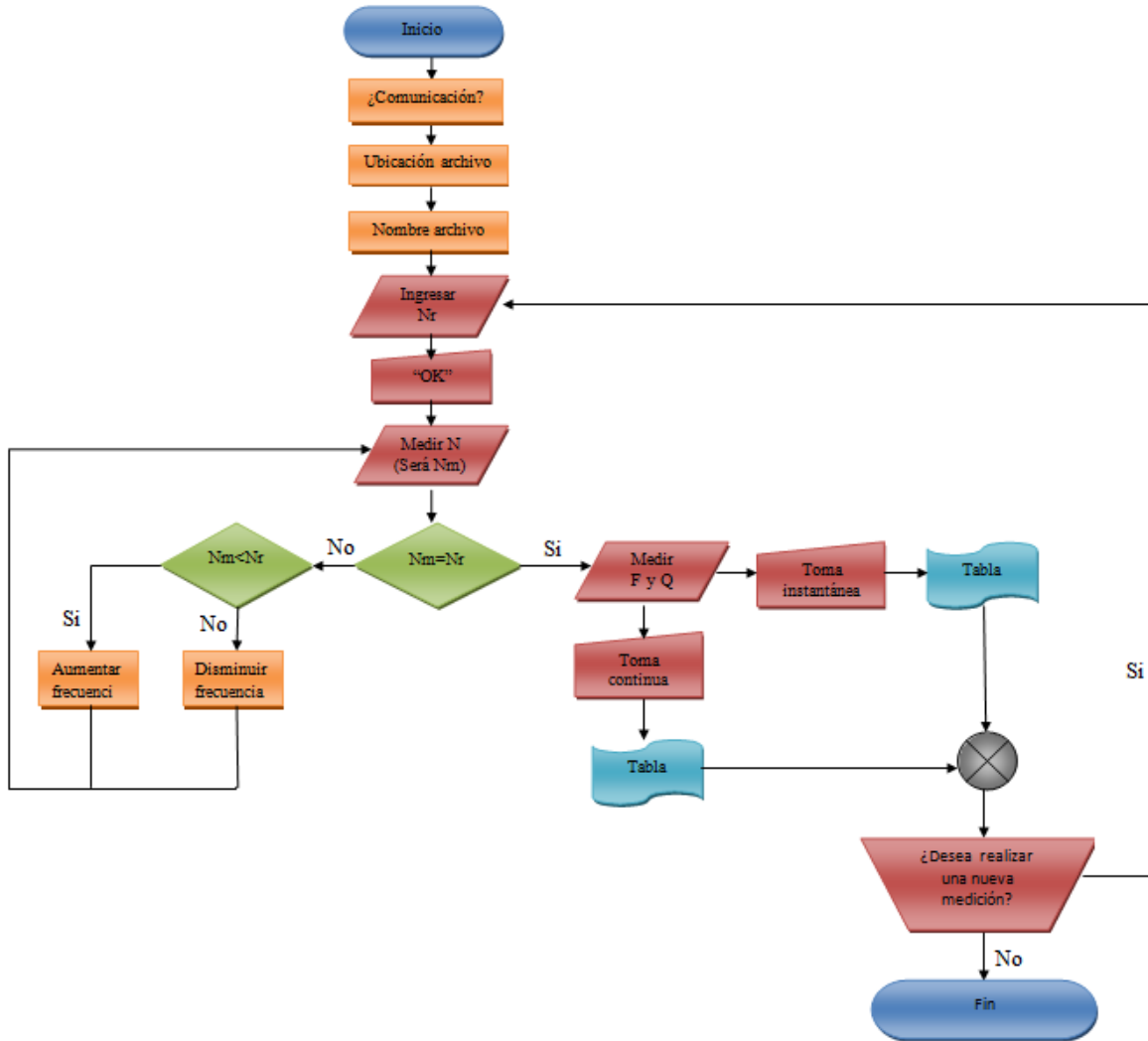


Figura 36. Interfaz gráfica del sistema de control para un banco de pruebas de una bomba de desplazamiento positivo (BDP)



✓ Diagrama de flujo del proceso realizado en LabVIEW

Figura 37. Diagrama de flujo LabVIEW



A continuación, se hace una breve explicación de cada uno de los pasos del diagrama de flujo de la figura 37:

- Inicio: Abrir la aplicación de LabVIEW [24]
- Verificar que existe comunicación entre el computador y el arduino
- Seleccionar la carpeta en la que quedará guardada la información tomada
- Darle el nombre que desee al archivo
- Ingresar el valor de velocidad de rotación de la bomba va a operar

- Oprimir el “botón” OK para enviar la información de la velocidad de rotación al arduino, y que el motor que esta acoplado a la bomba, comience a trabajar
- Medir la señal del encoder quien estará indicando la velocidad real de giro del eje Bomba-motor
- Si la velocidad de rotación ingresada no es igual a la velocidad de rotación medida se deberá ajustar la frecuencia del variador. En caso de que la ($N_m < N_r$), se aumentará la frecuencia, en caso contrario se disminuirá la frecuencia
- Si la velocidad de rotación ingresada es igual a la velocidad de rotación medida ($N_m = N_r$), se medirán las señales del sensor de flujo (Q) y de la celda de carga (F)
- Realizar la toma de datos. Para este paso se puede elegir entre tomar los valores de forma continua, es decir que el sistema registre los datos en la tabla hasta que se le indique lo contrario; o hacerlo uno a uno en toma instantánea y así que el usuario pueda definir cuantos datos desea por cada punto de operación de la bomba.
- Repetir el ciclo. Se puede cambiar la velocidad de rotación del eje bomba-motor y registrar los nuevos datos para los nuevos parámetros de operación de la bomba de desplazamiento positivo.

✓ Descripción de los bloques principales.

El primer bloque, figura 38, se trata de donde guardar la información de las pruebas que se realizarán. Para esto es necesario seleccionar la carpeta en la que el archivo quedará guardado y el nombre que éste llevará. En la figura 39 se muestra el cuadro correspondiente a esta actividad, pero en el programa de *LabVIEW*.

Figura 38. Diagrama de bloques para guardar la información.

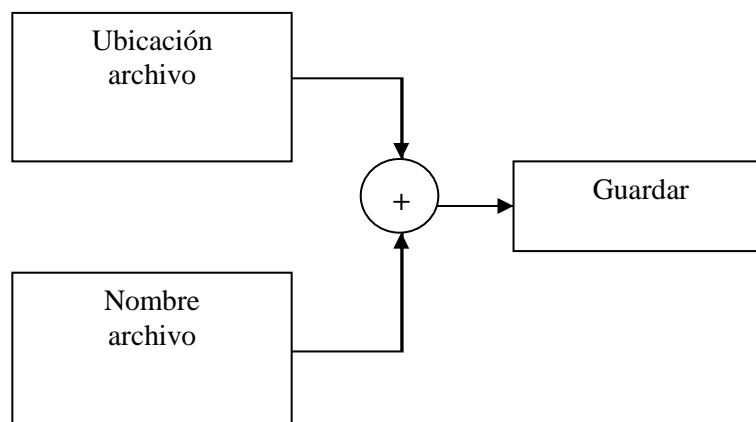
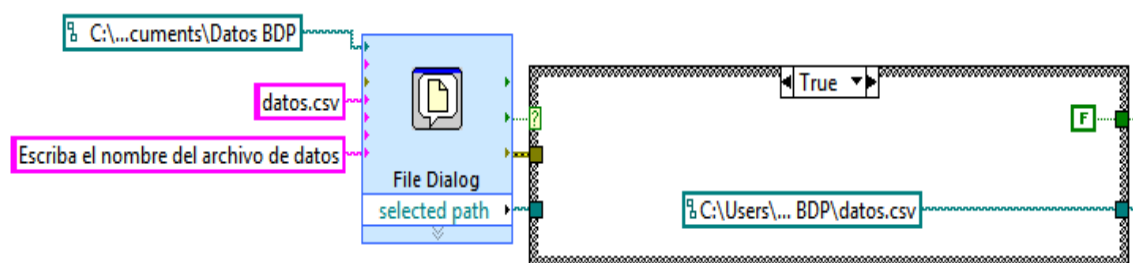
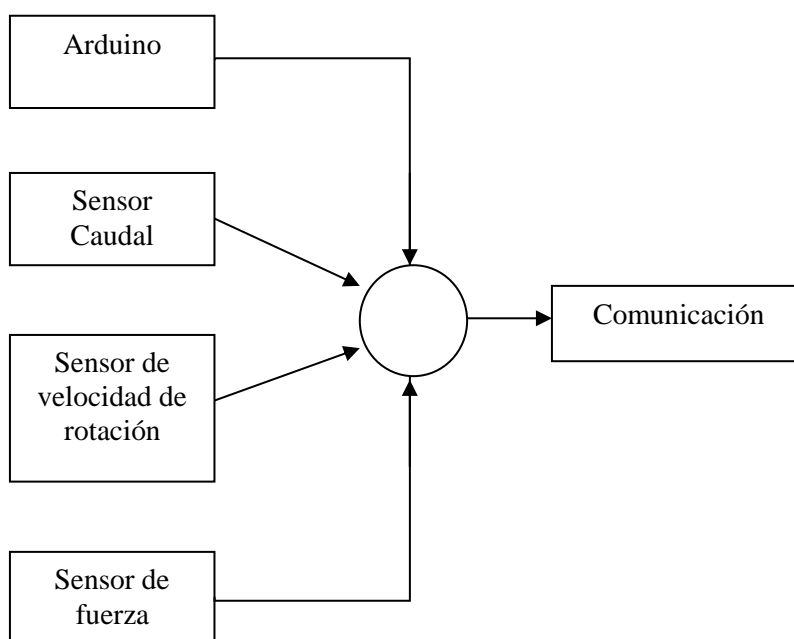


Figura 39. Bloque para guardar la información en *LabVIEW*



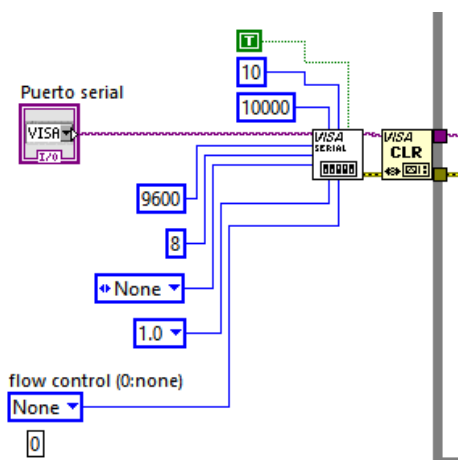
El segundo bloque es el de comunicación, figura 40. Acá se muestra que para que se dé la comunicación adecuada, se deben sumar las señales del sensor de caudal, de la velocidad de rotación y de la fuerza a la señal del arduino para así poderse comunicar de forma correcta con el computador

Figura 40. Diagrama de bloques para la comunicación.



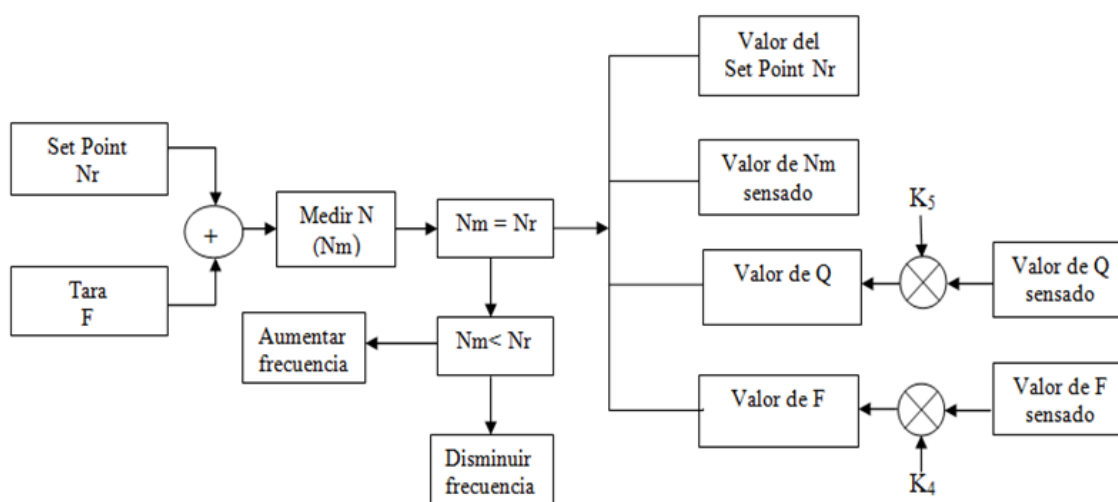
En la figura 41 se puede observar el cuadro correspondiente a la comunicación en el diagrama de bloques del software usado.

Figura 41. Bloque para comunicación en LabVIEW [18]



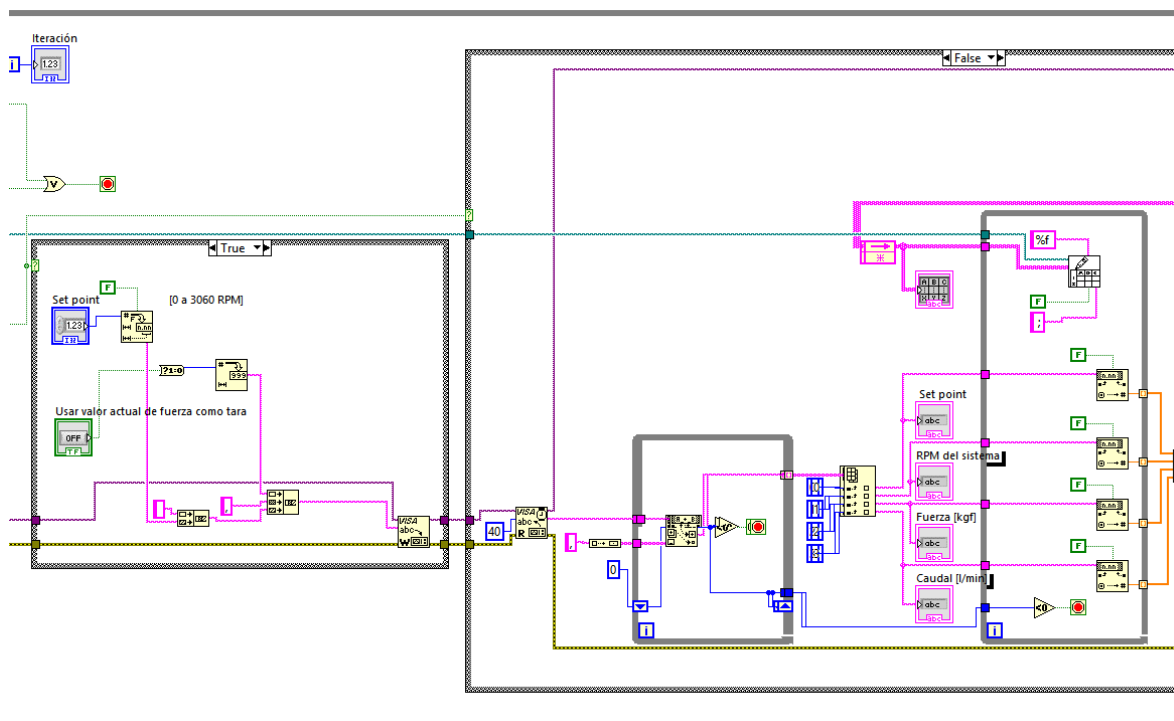
Luego sigue el bloque tres, que será el de introducción de variables y registro de señales, figura 42. En esta etapa se introducirá el valor de velocidad de rotación al que se desea operar la bomba y está también la opción de darle un valor de tara (que implicaría usar el valor actual de fuerza como el inicial) a la fuerza en caso de ser necesario. Después de introducir el valor de velocidad de referencia (N_r) se realiza la comparación entre este y el valor sensado por el encoder. De ser necesario se hará la corrección de frecuencia del variador y se leerán las otras señales con su respectiva corrección (cabe recordar, que la señal de fuerza y de caudal fue necesario multiplicarlas por las constantes K_4 y K_5 halladas en los numerales 2.4.1 y 2.4.2, respectivamente).

Figura 42. Diagrama de bloques para el procesamiento de datos



La figura 43 permite observar el mismo procesamiento del diagrama de bloques para el procesamiento de datos, pero ahora el LabVIEW

Figura 43. Bloque para el procesamiento de datos en LabVIEW



Por último, está el registro de datos presentados en una tabla. Estos son los datos que quedarán guardados en el archivo y que se podrán exportar a una hoja de cálculo para su posterior procesamiento. Las figuras 44 y 45 muestran el diagrama de bloques de este paso.

Figura 44. Diagrama de bloques del registro de datos

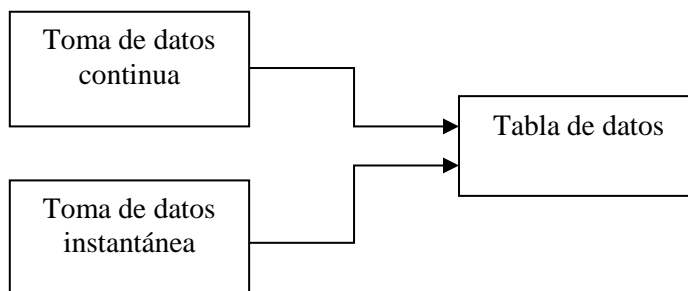
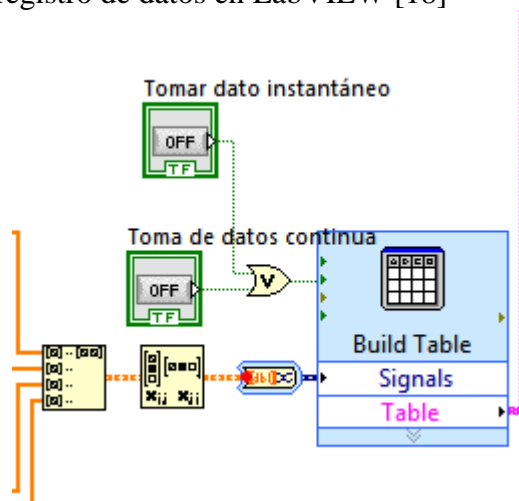


Figura 45. Bloque para el registro de datos en LabVIEW [18]



- ✓ **Programación en PDE.** Se incluirá un fragmento del código de programación y en el anexo A se encontrará el código completo.

```
#include "HX711.h"

#define DOUT A1
#define CLK A0

String escala="0";
String otro="0";
int tara=0;
boolean activar_tara=0;
int i = 0;
float Fuerza;
HX711 balanza(DOUT, CLK);

volatile unsigned int pulsos_conteo; // Variable que lleva la cuenta de los pulsos
recibidos por el encoder
float rpm=0; // Variable que calcula las rpm
long tiempo_inicio; // Almacena el valor de tiempo inicial para la ventana de
muestreo
long tiempo_actual; // Almacena el valor de tiempo final para la ventana de
muestreo
int cuenta; // Variable que permite definir el momento para enviar el dato por el
puerto serial
String comando_entrada="0"; // Cadena que entra por el puerto serial
String set_point="0"; // set point inicia en cero
float vlr_set_point=0; // valor de set point inicia en cero
float setp=0;
```

```
int digPin = 6; // pin digital 6
int n=0;
```

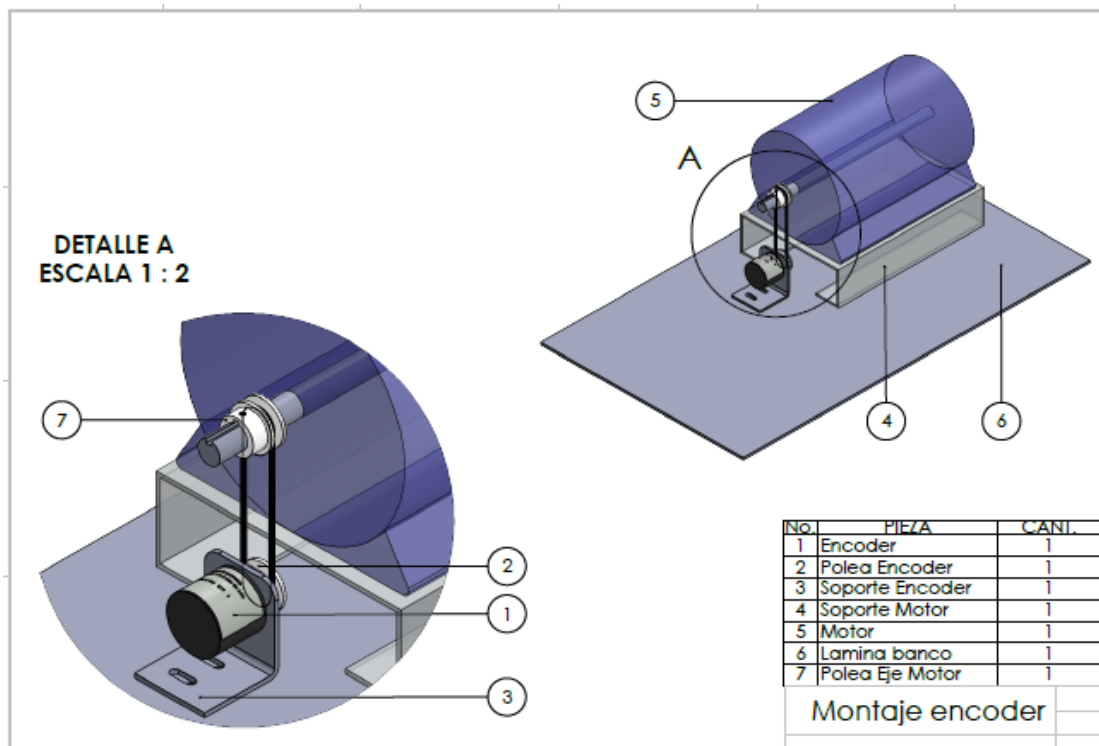
3. MONTAJE Y PUESTA A PUNTO

En este capítulo se describirán los elementos necesarios para el montaje de los nuevos dispositivos del banco hidráulico, para así poder realizar las pruebas en la bomba de engranajes externos y determinar si el sistema de control diseñado entrega los resultados deseados.

3.1 MONTAJE MECÁNICO

3.1.1 Encoder Incremental. En este tipo de encoder el disco codificado ésta conectado a un eje giratorio que a su vez, es el elemento que permite acoplarlo mecánicamente a otro. Se decidió usar entonces, una transmisión por correa entre el eje del encoder y el eje del motor que está acoplado a la bomba de desplazamiento positivo, tal y como se muestra en la figura 46.

Figura 46. Diseño del Montaje encoder



La transmisión por correa, es uno de los principales sistemas empleados en máquinas para transmitir el movimiento generado en una polea conductora a varios dispositivos de la máquina, pudiendo modificar sus características de velocidad y sentido. Está compuesto por un juego de poleas y un número definido de correas y presenta como ventaja la flexibilidad en los montajes.

Para el caso del montaje en el banco hidráulico, el encoder se ubicará de tal forma que el eje de éste quede paralelo al eje del motor, así el eje conducido (eje del encoder) tendrá el mismo sentido de rotación que el eje conductor (eje del motor).

En todos los sistemas de transmisión, el aumento o disminución de la velocidad depende de la relación de transmisión. Para la transmisión entre el encoder y el eje del motor no se requiere cambio en la velocidad, por lo tanto, la relación será de 1:1 y por consiguiente, el diámetro de las poleas igual

La correa de transmisión para el sistema debe ser muy corta, pues la distancia entre ejes es pequeña. Se buscó comercialmente una correa que pudiera servir para tal fin y las que más se acercaban al requerimiento fueron las correas usadas en las máquinas de coser. Se eligió la correa MB 340 por ser la más corta que cumplía con el requerimiento de potencia del motor.

Para el diseño de las poleas, se conoce el valor del diámetro de los ejes sobre los que irán montadas y ya se determinó que el diámetro primitivo (sobre el que va la correa de transmisión) para ambas será igual, pero no se ha determinado cual será el valor de éste. Teniendo la longitud de la correa y la distancia entre ejes se calcula el valor que tendrá en diámetro primitivo de las poleas.

La longitud primitiva de la correa de una transmisión se calcula directamente a partir de la siguiente expresión:

$$L_p = 2E + \frac{\pi}{2}(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4E} \quad (3.2)$$

Donde, L_p Longitud primitiva de la correa de transmisión
E es la distancia entre ejes de poleas;
d es el diámetro de la polea menor;
D es el diámetro de la polea mayor;
 π es el número pi (3,14159265)

Siguiendo las consideraciones de la relación de transmisión, $D = d = D_p$; la fórmula (3,2) queda expresada así:

$$L_p = 2E + \frac{\pi}{2}(2D_p) \quad (3.3)$$

Como lo que se requiere conocer es el diámetro primitivo para las poleas, se despeja (D_p) y se reemplazan los valores

$$D_p = \frac{L_p - 2E}{\pi} = \frac{334 \text{ mm} - 2(135,5 \text{ mm})}{\pi} = 20,05 \text{ mm} \quad (3.4)$$

$$D_p = 20 \text{ mm} = 0,02m$$

El plano de la polea que va montada sobre el eje del motor, se muestran en la figura 47 y la figura 48 corresponde al plano de la polea que va en el encoder.

Figura 47. Plano de la polea eje motor

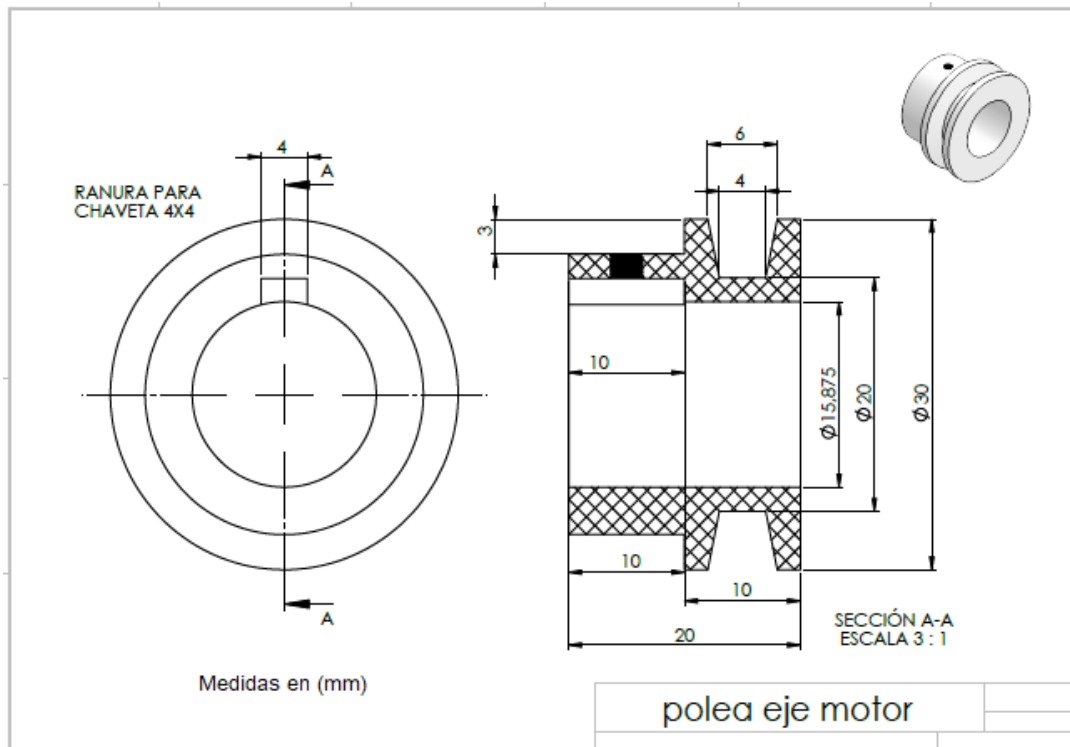
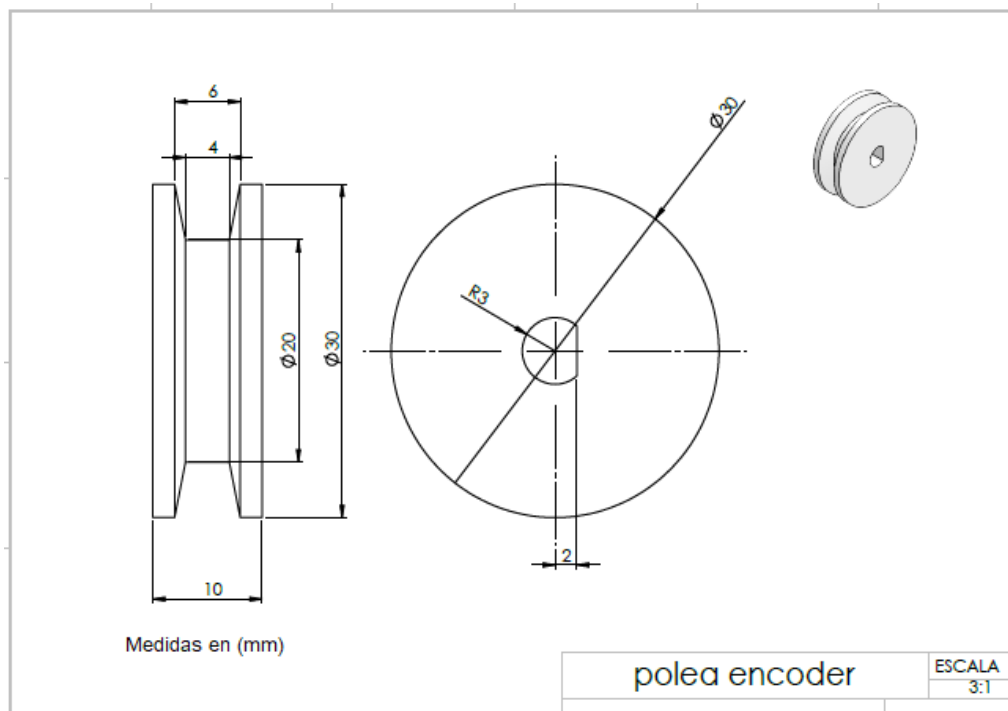


Figura 48. Plano de la polea encoder



Para diseñar la placa soporte del encoder, se tomaron como referencia, los soportes que se usaron para las bombas del banco hidráulico. El soporte se hizo en platina calibre 11. Para la medida del orificio en el que va ubicado el encoder se tuvo en cuenta la distancia entre ejes con el que se hizo el diseño de la transmisión mecánica, y los orificios de sujeción a la lámina del banco, se hicieron tipo corredera para así poder tensar la correa de ser necesario. El montaje del encoder se muestra en la figura 49, y los planos para la palca soporte de éste, en la figura 50

Figura 49. Montaje final del encoder

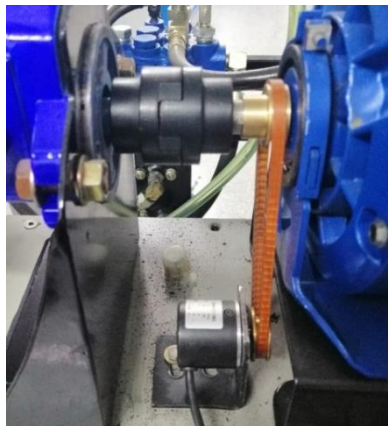
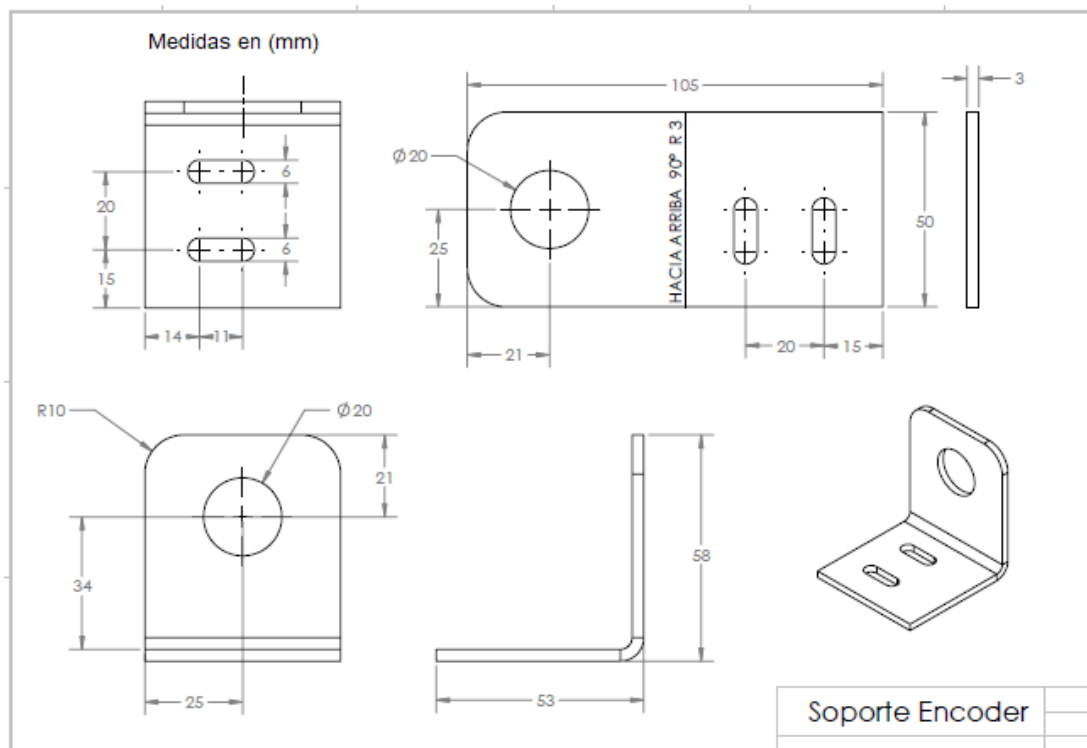


Figura 50. Plano del soporte del encoder



3.1.2 Sensor de caudal. Este elemento se instaló en la línea de descarga de la bomba justo después del flujómetro. Para el montaje sólo fue necesario un tubo de cobre de 3/8" de diámetro por 0,15 m de longitud y los racores de 3/8 para la conexión, tal y como se puede ver en la figura 51.

Figura 51. Montaje sensor de flujo



3.1.3 Placa para montaje. El variador de frecuencia y el contactor eléctrico son elementos que se mantenían externos al banco hidráulico, es decir, se conectaban sólo cuando la práctica de laboratorio de bombas de desplazamiento positivo se iba a desarrollar. Una de las metas trazadas en el momento de formular el presente proyecto, fue dejar el banco con todos los elementos que éste necesitara para su funcionamiento y así no estar moviendo los equipos de un lado a otro; así que era necesario un soporte en el cual poder montar estos elementos más algunos nuevos.

La placa para este montaje, se diseñó a partir de las dimensiones de los elementos que se situarían ahí y del diseño del banco hidráulico. La estructura original del banco, cuenta con una división horizontal en lámina, 435 mm por debajo de donde está montado todo el sistema hidráulico, allí se encuentra ubicado el depósito de aceite y quedaba un espacio vacío. El variador de frecuencia está diseñado para trabajar en posición vertical, entonces, ese fue el punto de partida para el diseño de la placa, sería una lámina vertical que quedara entre las dos superficies horizontales, aprovechando el espacio disponible y que en ella se pudieran montar los elementos restantes. El plano de esta placa de soporte se muestra en la figura 52 y en la figura 53 se observa el ensamble del variador, el contactor eléctrico y el interruptor sobre la placa.

Figura 52. Plano de la placa vertical para soporte de elementos

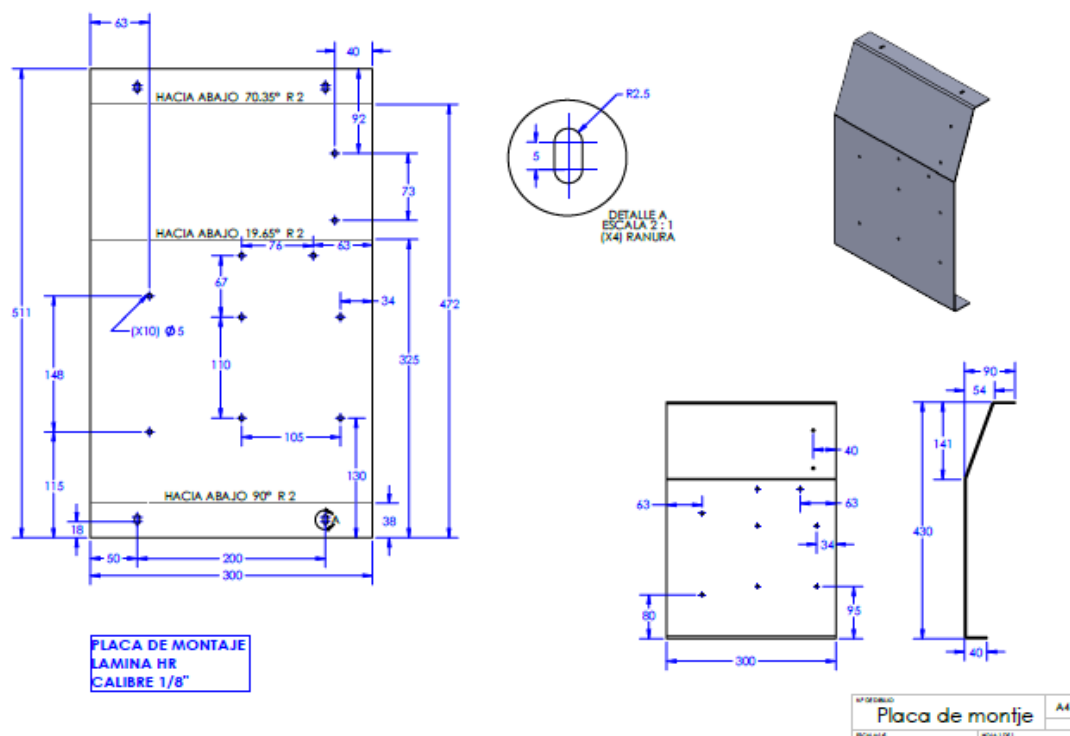
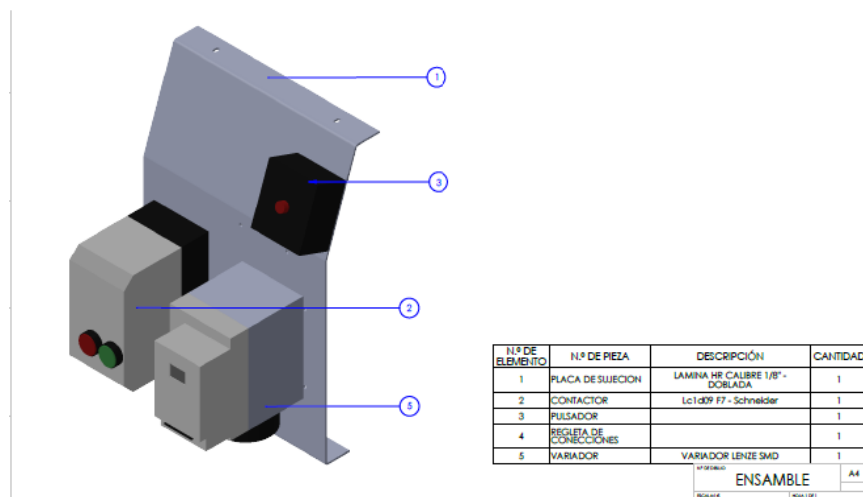
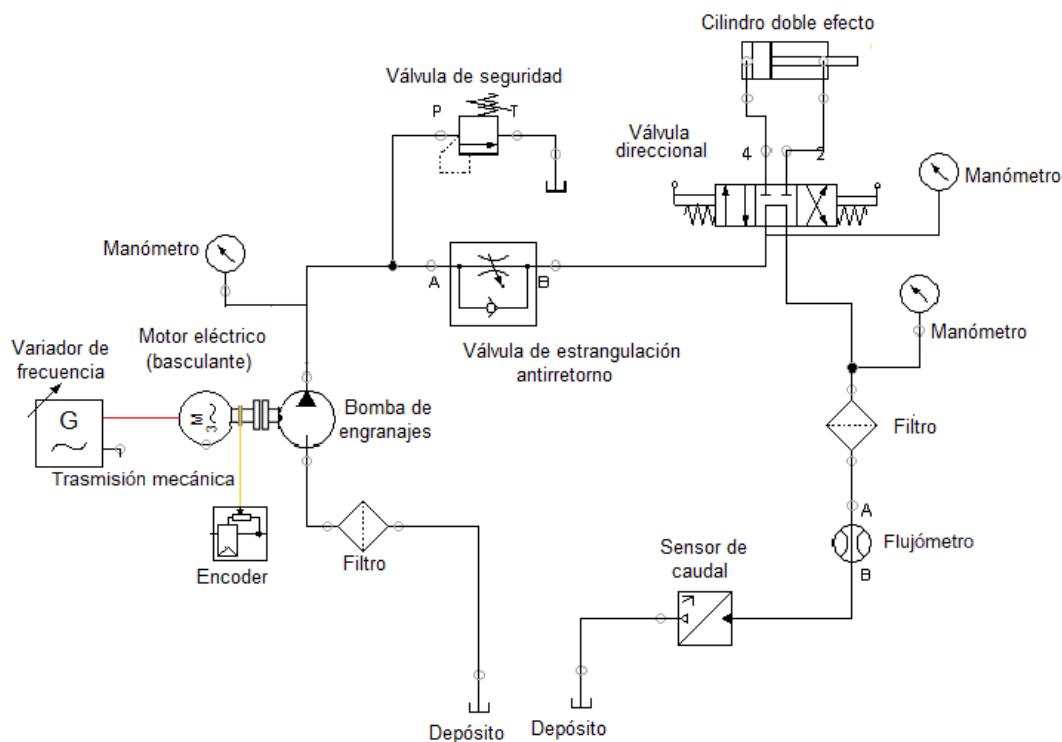


Figura 53. Montaje de los elementos en la placa vertical



3.1.4 Diagrama del sistema. La figura 54 reúne los diferentes elementos que componen el banco hidráulico de pruebas, los medidores requeridos para la obtención de las variables involucradas en el proceso y los elementos a controlar.

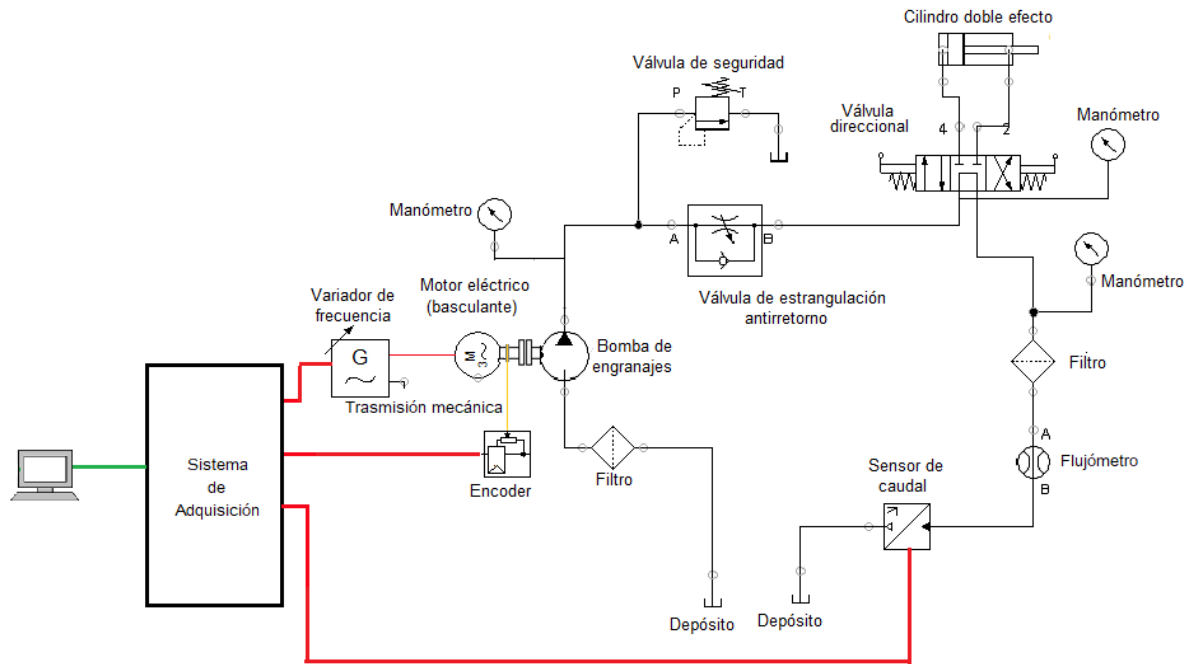
Figura 54. Diagrama del sistema



3.1.5 Conexiones de los componentes electrónicos. Las conexiones entre el microcontrolador, el transmisor y la bornera, a los elementos externos del banco como son los sensores de fuerza, caudal y velocidad angular, y al variador de frecuencia, se muestran en el diagrama eléctrico (anexo C: Módulo de acondicionamiento y adquisición de señales del banco hidráulico).

Y en la figura 55 se puede observar el sistema integrado, es decir, el sistema hidráulico unido al sistema de adquisición de datos. Las líneas rojas representan las señales eléctricas entre los dos sistemas.

Figura 55. Sistema de adquisición integrado



4. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 DATOS TOMADOS EN EL BANCO HIDRÁULICO, PARA LA BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO TIPO ENGRANAJES EXTERNOS, MEDIANTE EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DISEÑADO

Cuando se habla de caracterizar una bomba hidráulica significa obtener las curvas características del sistema para determinar si el comportamiento del dispositivo estudiado es correcto o se está presentando algún tipo de diferencias respecto a las curvas teóricas.

Para la caracterización de la bomba de engranajes se deben construir las siguientes curvas:

- Caudal vs. Presión de descarga a velocidad de rotación constante.
- Potencia de accionamiento vs. Presión de descarga a velocidad de rotación constante.
- Eficiencia vs Presión de descarga a velocidad de rotación constante.

Algunas de estas variables, como por ejemplo presión y caudal, se miden directamente y se registran en la toma de datos; pero otras como la potencia y la eficiencia, requieren de cálculos para su determinación.

Es así que en las sesiones de pruebas realizadas y a partir del sistema de adquisición de datos, se obtuvieron datos experimentales promedio para caudal y fuerza a partir de unos valores de presión establecidos (según la escala del manómetro disponible en el banco hidráulico) y a cuatro velocidades de rotación diferentes. En las tablas 20, 21, 22 y 23, se pueden observar dichas mediciones, además, se incluyeron las desviaciones estándar para el caudal y la fuerza, halladas mediante el uso del software (Minitab 2018 ®) [16]. Las unidades de las variables medidas se expresan en las unidades del instrumento utilizado para dicha medición.

En el caso de las desviaciones estándar, para los caudales se presentan valores más altos que para la fuerza e igualmente se evidencia que para rangos medios de caudal, estos valores son menores que para los valores límites de la medición. El valor más alto de la desviación estándar que se presenta para un caudal es de $\pm 1,130$, (tabla 20) para una presión de operación de la bomba de 200 psi. En el caso de la fuerza, las desviaciones estándar más altas se dan en la tabla 23, donde la bomba está operando a 2400 rpm; es decir, su motor está haciendo un mayor trabajo. El valor más alto es la desviación para la fuerza es de $\pm 0,690$ a una presión de operación de 360 psi.

Tabla 20. Datos experimentales promedio de la bomba de engranajes externos operando a 1600 rpm

TABLA DE DATOS		
N= 1600 [rpm]		
P [psi]	Q [L/min]	F [kg-f]
50	7,75 ± 0,967	0,51 ± 0,013
100	7,83 ± 0,967	0,63 ± 0,008
150	7,16 ± 0,727	0,75 ± 0,016
200	6,24 ± 1,130	0,85 ± 0,016
240	6,32 ± 0,297	0,94 ± 0,011
280	5,14 ± 0,460	1,04 ± 0,016
320	5,65 ± 0,637	1,14 ± 0,037
360	4,39 ± 0,871	1,24 ± 0,023
400	4,39 ± 0,637	1,36 ± 0,030
440	4,39 ± 0,230	1,47 ± 0,039
480	2,62 ± 0,351	1,59 ± 0,015
520	2,54 ± 0,786	1,72 ± 0,036

Tabla 21. Datos experimentales promedio de la bomba de engranajes externos operando a 2000 rpm

TABLA DE DATOS		
N=2000 [rpm]		
P [psi]	Q [L/min]	F [kg-f]
50	9,60 ± 0,808	0,50 ± 0,011
100	7,83 ± 0,479	0,60 ± 0,009
150	7,92 ± 0,548	0,71 ± 0,009
200	7,33 ± 0,230	0,82 ± 0,012
240	6,57 ± 0,376	0,90 ± 0,014
280	6,49 ± 0,637	1,03 ± 0,021
320	5,73 ± 0,230	1,10 ± 0,020
360	5,73 ± 1,050	1,21 ± 0,027
400	5,40 ± 0,460	1,35 ± 0,023
440	5,06 ± 0,420	1,43 ± 0,023
480	4,30 ± 0,188	1,54 ± 0,024
520	3,63 ± 0,230	1,70 ± 0,023
560	3,30 ± 0,351	1,80 ± 0,032

Tabla 22. Datos experimentales promedio de la bomba de engranajes externos operando a 2200 rpm

TABLA DE DATOS		
N=2200 [rpm]		
P [psi]	Q [L/min]	F [kg-f]
100	9,59 ± 0,865	0,53 ± 0,012
150	8,75 ± 0,457	0,71 ± 0,007
200	8,50 ± 0,351	0,74 ± 0,005
240	7,50 ± 0,351	0,89 ± 0,009
280	7,33 ± 0,479	0,99 ± 0,013
320	7,16 ± 0,190	1,06 ± 0,027
360	6,24 ± 0,188	1,19 ± 0,029
400	5,98 ± 0,351	1,38 ± 0,034
440	5,56 ± 0,460	1,46 ± 0,040
480	5,40 ± 0,351	1,58 ± 0,020
520	5,14 ± 0,548	1,70 ± 0,040
560	4,30 ± 0,188	1,80 ± 0,004
600	3,80 ± 0,000	1,92 ± 0,051

Tabla 23. Datos experimentales promedio de la bomba de engranajes externos operando a 2200 rpm

TABLA DE DATOS		
N=2400 [rpm]		
P [psi]	Q [L/min]	F [kg-f]
100	10,76 ± 0,967	0,55 ± 0,004
150	9,93 ± 0,478	0,69 ± 0,016
200	9,01 ± 0,636	0,80 ± 0,010
240	8,34 ± 0,351	0,92 ± 0,026
280	7,83 ± 0,563	1,03 ± 0,024
320	7,58 ± 0,514	1,17 ± 0,514
360	7,24 ± 0,690	1,23 ± 0,690
400	6,99 ± 0,376	1,37 ± 0,376
440	6,07 ± 0,230	1,48 ± 0,230
480	5,48 ± 0,000	1,63 ± 0,000
520	5,65 ± 0,230	1,69 ± 0,230
560	4,64 ± 0,000	1,88 ± 0,000
600	4,47 ± 0,376	1,98 ± 0,376

Puesto que los instrumentos de medición para el caudal y la fuerza fueron caracterizados, con el objetivo de obtener un mejor análisis estadístico de estas variables y asegurar la confiabilidad en la medición, se determinaron los intervalos de confianza al 95% (IC) de cada característica mencionada. Para un intervalo de confianza bilateral, el margen de error es la distancia desde el estadístico estimado hasta cada valor del intervalo de confianza. Mientras mayor sea el margen de error, más ancho será el intervalo y menos seguro se estará del valor de la estimación de punto.

En las figuras 56, 57, 58, y 59 se presentan las gráficas obtenidas para los intervalos de confianza (IC) para los caudales a las velocidades de rotación de 1600 rpm, 2000 rpm, 2200 rpm y 2400 rpm respectivamente. En estas figuras se puede observar que el intervalo de confianza para el caudal es muy cercano al valor de la media, lo que permite ratificar que los datos que entrega el sensor, después de la caracterización realizada, son valores confiables.

Figura 56. Gráfica de Intervalos de Confianza para el caudal cuando la bomba está operando a 1600 rpm

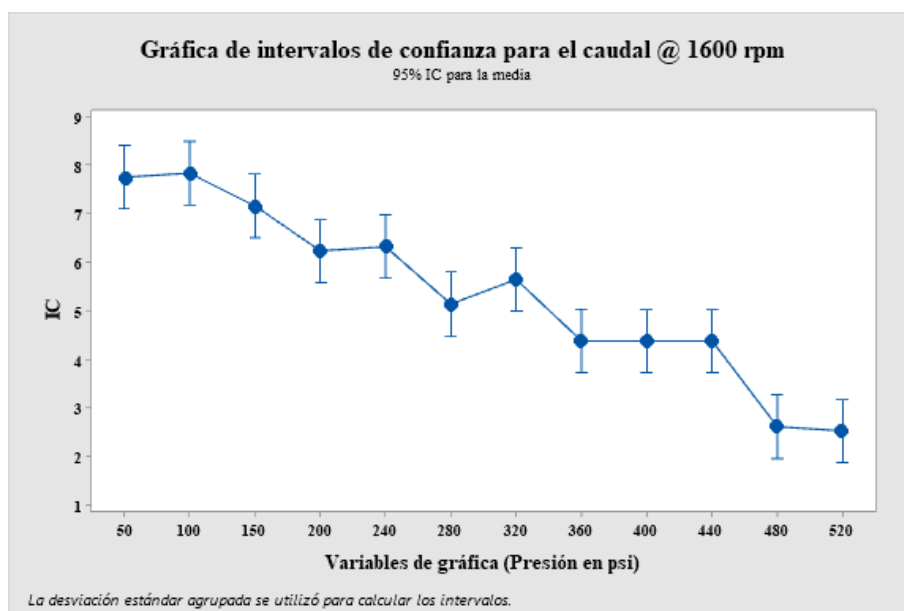


Figura 57. Gráfica de Intervalos de Confianza para el caudal cuando la bomba está operando a 2000 rpm

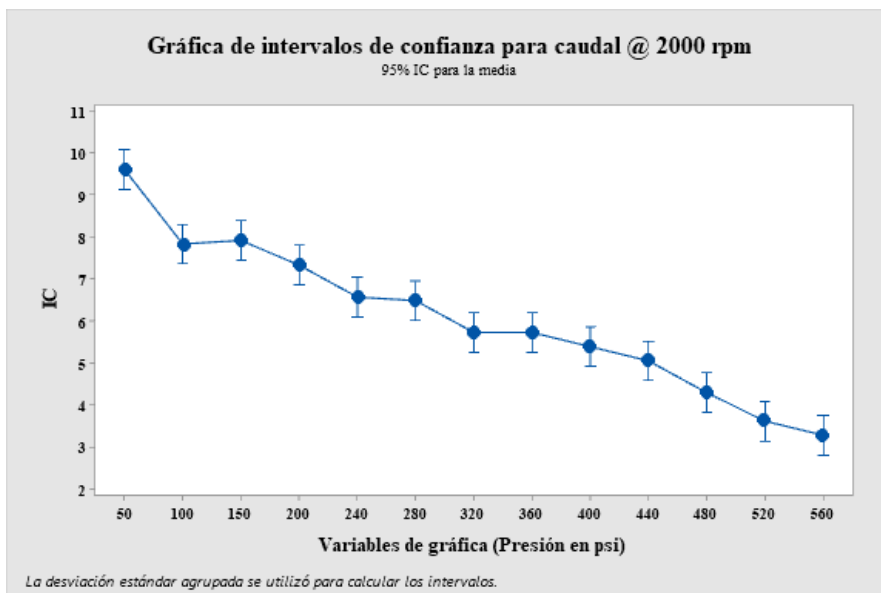


Figura 58. Gráfica de Intervalos de Confianza para el caudal cuando la bomba está operando a 2200 rpm

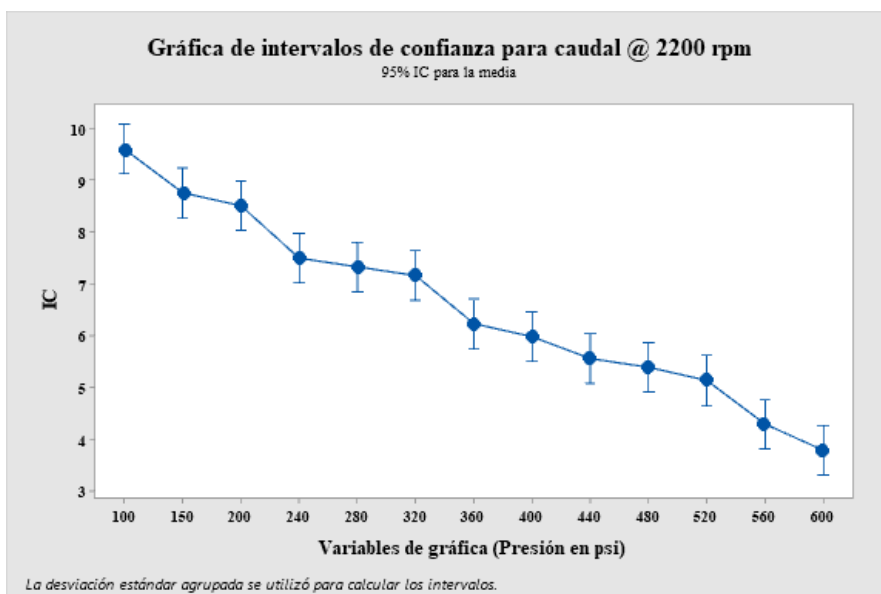
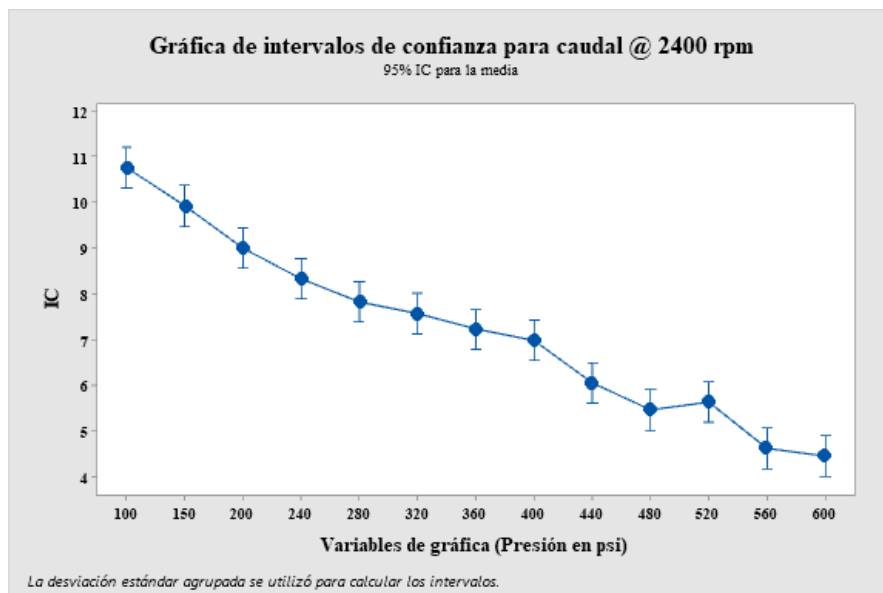


Figura 59. Gráfica de Intervalos de Confianza para el caudal cuando la bomba está operando a 2400 rpm



A continuación, se presentan las figuras 60, 61, 62 y 63 cuyas gráficas obtenidas muestran intervalos de confianza (IC) para la fuerza mucho más pequeños que para el caudal, lo que representa mayor precisión en los datos tomados con la celda de carga.

Figura 60. Gráfica de Intervalos de Confianza para la fuerza cuando la bomba está operando a 1600 rpm

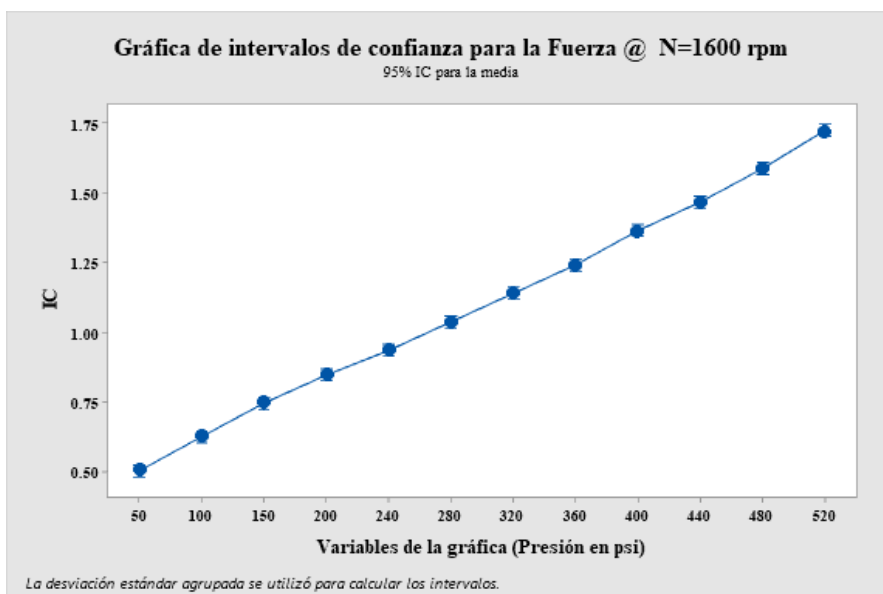


Figura 61. Gráfica de Intervalos de Confianza para la fuerza cuando la bomba está operando a 2000 rpm

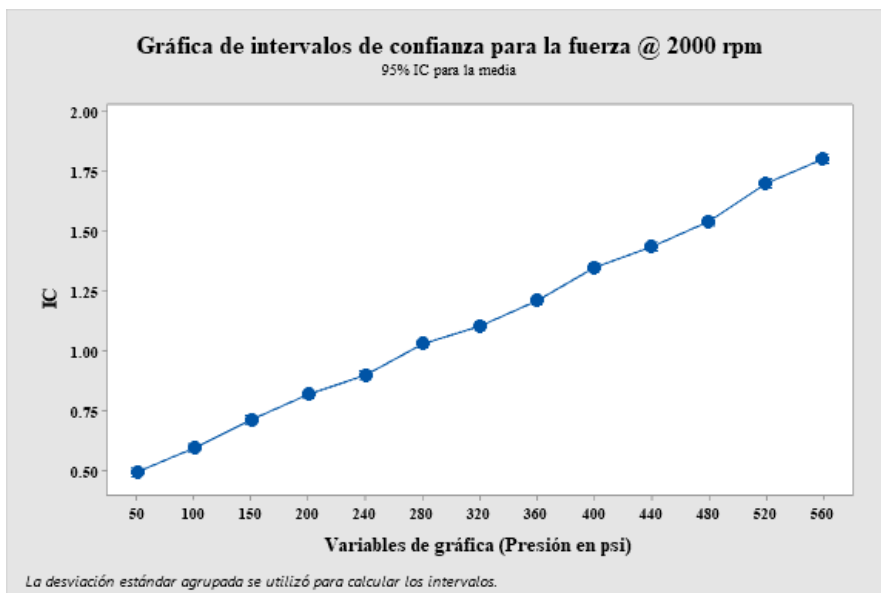


Figura 62. Gráfica de Intervalos de Confianza para la fuerza cuando la bomba está operando a 2200 rpm

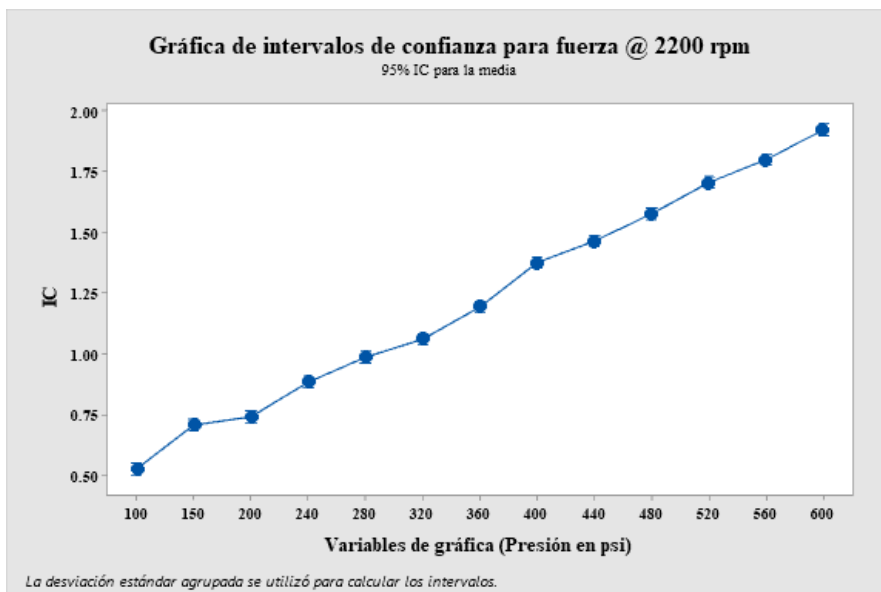
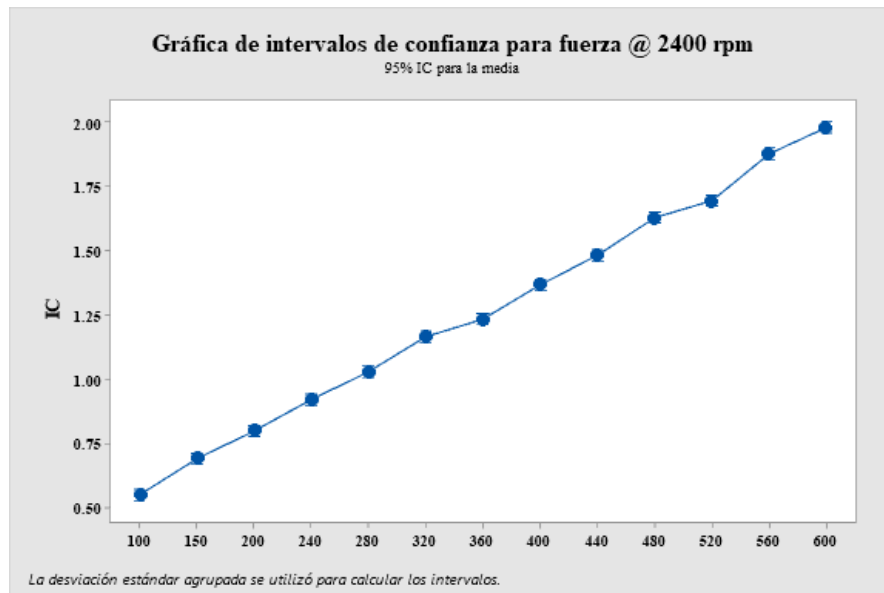


Figura 63. Gráfica de Intervalos de Confianza para la fuerza cuando la bomba está operando a 2400 rpm



4.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA DE ENGRANAJES EXTERNOS

Para determinar los parámetros de operación de la bomba y trazar las curvas características, es necesario realizar algunas conversiones de unidades y algunos cálculos a partir de las expresiones mostradas en el capítulo 2. A continuación se mostrará el desarrollo matemático necesario para completar la tabla 23, tomando como ejemplo la primera fila de datos de la tabla 19:

4.2.1 Determinación de la potencia de accionamiento [BkW]. Para el cálculo de la potencia se hará uso de la fórmula (2.19):

$$BkW = \dot{W}_{accionamiento} = T\omega = Fd\omega$$

Donde:

- $d = K_3$, es el valor del brazo del motor basculante el cual mide 0,16 m
- La Fuerza para primera medición arroja un valor de 0,51 kg-f que al convertirla al Sistema Internacional da un valor de 5,00 N
- La velocidad de rotación de la bomba es de 1660 rpm y debe ser expresada como velocidad angular, así:

$$1600 \frac{rev}{min} \times \frac{2\pi rad}{1 rev} \times \frac{1 min}{60 s} = 53,33 \pi \frac{rad}{s}$$

Por lo tanto, la potencia de accionamiento será:

$$BkW = 5,00 N \times \frac{1 kN}{1000 N} \times 0,16 m \times 53,33 \pi \frac{rad}{s}$$

$$BkW = 0,13$$

4.2.2 Determinación de la potencia del fluido [FkW]. Haciendo Uso de la fórmula (2.15) se llega al valor de la potencia hidráulica o potencia del fluido.

$$FkW = \dot{W}_{hidráulica} = PQ$$

Se debe tener en cuenta las conversiones necesarias para que la potencia quede expresada en kW.

$$FkW = 50 psi \times \frac{1 kPa}{0,145 psi} \times 7,75 \frac{L}{min} \times \frac{1 m^3}{1000 L} \times \frac{1 min}{60 s}$$

$$FkW = 0,04$$

4.2.3 Determinación de la eficiencia de la bomba [η]. La expresión (2.18) indica que la eficiencia de la bomba se puede determinar a partir de la relación entre sus potencias, y estas ya se determinaron, así que:

$$\eta_{bomba} = \frac{\dot{W}_{hidráulica}}{\dot{W}_{accionamiento}} = \frac{FkW}{BkW} = \frac{0,04}{0,13}$$

$$\eta_{bomba} = 0,33 = 33\%$$

Siguiendo el mismo procedimiento para todos los valores tomados, se obtienen los datos tabulados en las tablas 24, 25, 26 y 27 para las diferentes velocidades de operación de la bomba. A partir de los datos de caudal, potencia de accionamiento, eficiencia y presión se trazan las curvas características de operación para cada conjunto de datos.

Tabla 24. Tabla de resultados para la bomba de engranajes externos, operando a una velocidad de 1600 rpm

N=1600 rpm							
P [kPa]	Q [m ³ /s]	Q [L/min]	F [N]	T [N.m]	BkW	FkW	η
345	1,29E-04	7,75	5,00	0,80	0,13	0,04	0,33
689	1,31E-04	7,83	6,18	0,99	0,17	0,09	0,54
1034	1,19E-04	7,16	7,36	1,18	0,20	0,12	0,63
1379	1,04E-04	6,24	8,34	1,33	0,22	0,14	0,64
1655	1,05E-04	6,32	9,22	1,48	0,25	0,17	0,71
1931	8,57E-05	5,14	10,20	1,63	0,27	0,17	0,60
2206	9,42E-05	5,65	11,18	1,79	0,30	0,21	0,69
2482	7,32E-05	4,39	12,16	1,95	0,33	0,18	0,56
2758	7,32E-05	4,39	13,34	2,13	0,36	0,20	0,56
3034	7,32E-05	4,39	14,42	2,31	0,39	0,22	0,57
3309	4,37E-05	2,62	15,60	2,50	0,42	0,14	0,35
3585	4,23E-05	2,54	16,87	2,70	0,45	0,15	0,34

Figura 64. Curvas características de la bomba de engranajes externos a una velocidad de rotación de 1600 rpm

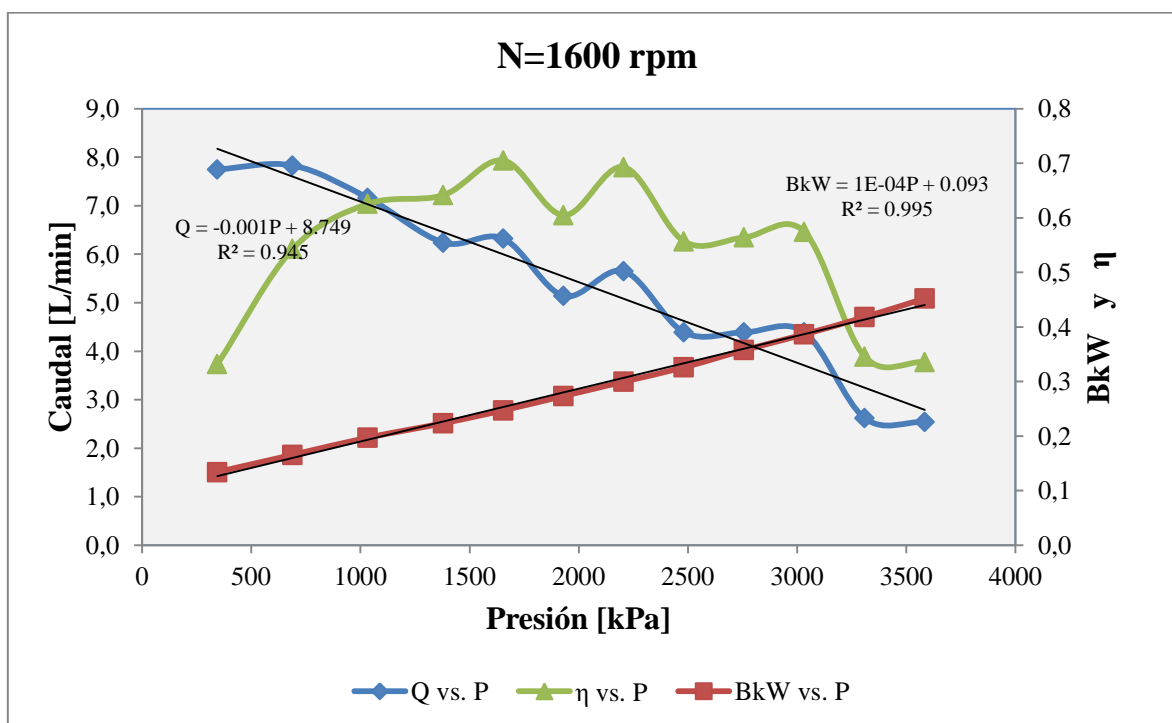


Tabla 25. Tabla de resultados para la bomba de engranajes externos, operando a una velocidad de 2000 rpm

N=2000 rpm							
P [kPa]	Q [m ³ /s]	Q [L/min]	F [N]	T [Nm]	BkW	FkW	η
345	1,60E-04	9,60	4,91	0,78	0,16	0,06	0,34
689	1,31E-04	7,83	5,89	0,94	0,20	0,09	0,46
1034	1,32E-04	7,92	6,97	1,11	0,23	0,14	0,58
1379	1,22E-04	7,33	8,04	1,29	0,27	0,17	0,62
1655	1,10E-04	6,57	8,83	1,41	0,30	0,18	0,61
1931	1,08E-04	6,49	10,10	1,62	0,34	0,21	0,62
2206	9,55E-05	5,73	10,79	1,73	0,36	0,21	0,58
2482	9,55E-05	5,73	11,87	1,90	0,40	0,24	0,60
2758	9,00E-05	5,40	13,24	2,12	0,44	0,25	0,56
3034	8,43E-05	5,06	14,03	2,24	0,47	0,26	0,54
3309	7,17E-05	4,30	15,11	2,42	0,51	0,24	0,47
3585	6,05E-05	3,63	16,68	2,67	0,56	0,22	0,39
3861	5,50E-05	3,30	17,66	2,83	0,59	0,21	0,36

Figura 65. Curvas características de la bomba de engranajes externos a una velocidad de rotación de 2000 rpm

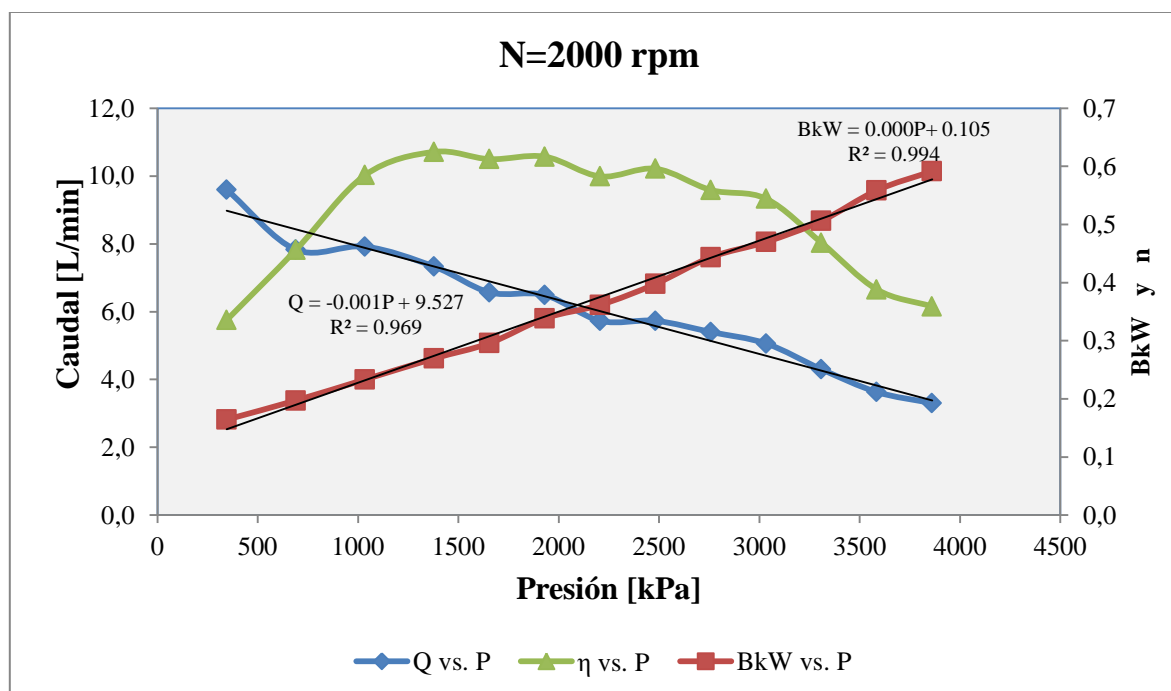


Tabla 26. Tabla de resultados para la bomba de engranajes externos, operando a una velocidad de 2200 rpm

N=2200 rpm							
P [kPa]	Q [m ³ /s]	Q [L/min]	F [N]	T [N.m]	BkW	FkW	η
689	1,60E-04	9,59	5,20	0,83	0,19	0,11	0,58
1034	1,46E-04	8,75	6,97	1,11	0,26	0,15	0,59
1379	1,42E-04	8,50	7,26	1,16	0,27	0,20	0,73
1655	1,25E-04	7,50	8,73	1,40	0,32	0,21	0,64
1931	1,22E-04	7,33	9,71	1,55	0,36	0,24	0,66
2206	1,19E-04	7,16	10,40	1,66	0,38	0,26	0,69
2482	1,04E-04	6,24	11,67	1,87	0,43	0,26	0,60
2758	9,97E-05	5,98	13,54	2,17	0,50	0,27	0,55
3034	9,27E-05	5,56	14,32	2,29	0,53	0,28	0,53
3309	9,00E-05	5,40	15,50	2,48	0,57	0,30	0,52
3585	8,57E-05	5,14	16,68	2,67	0,61	0,31	0,50
3861	7,17E-05	4,30	17,66	2,83	0,65	0,28	0,43
4137	6,33E-05	3,80	18,84	3,01	0,69	0,26	0,38

Figura 66. Curvas características de la bomba de engranajes externos a una velocidad de rotación de 2200 rpm

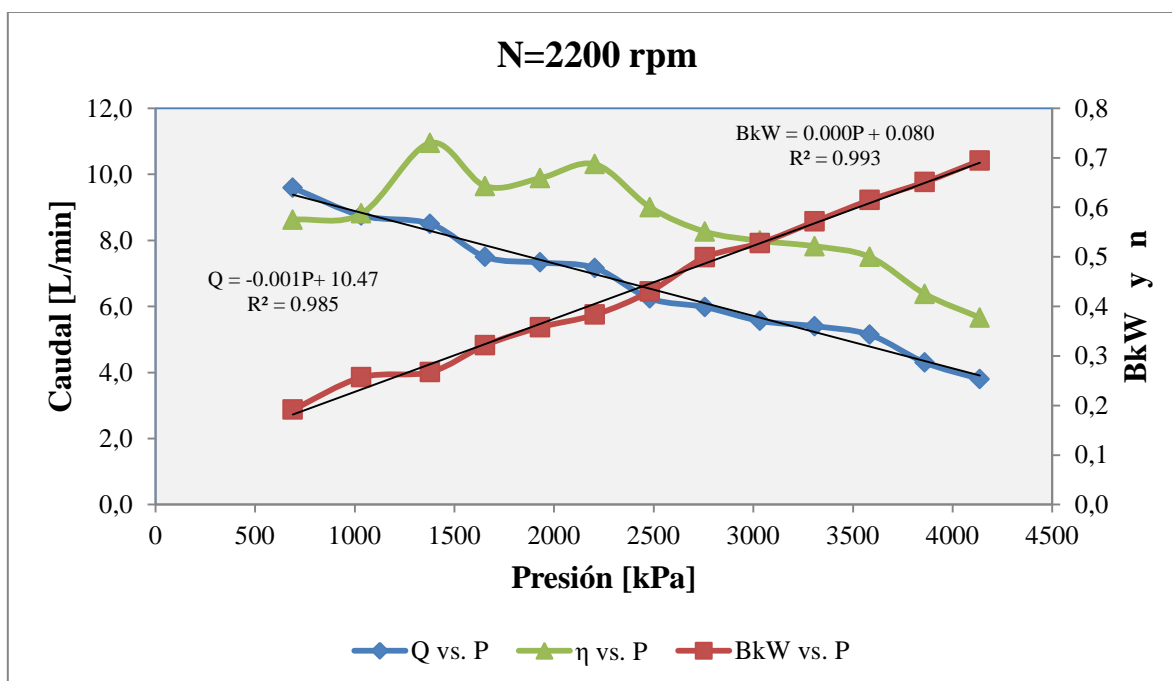
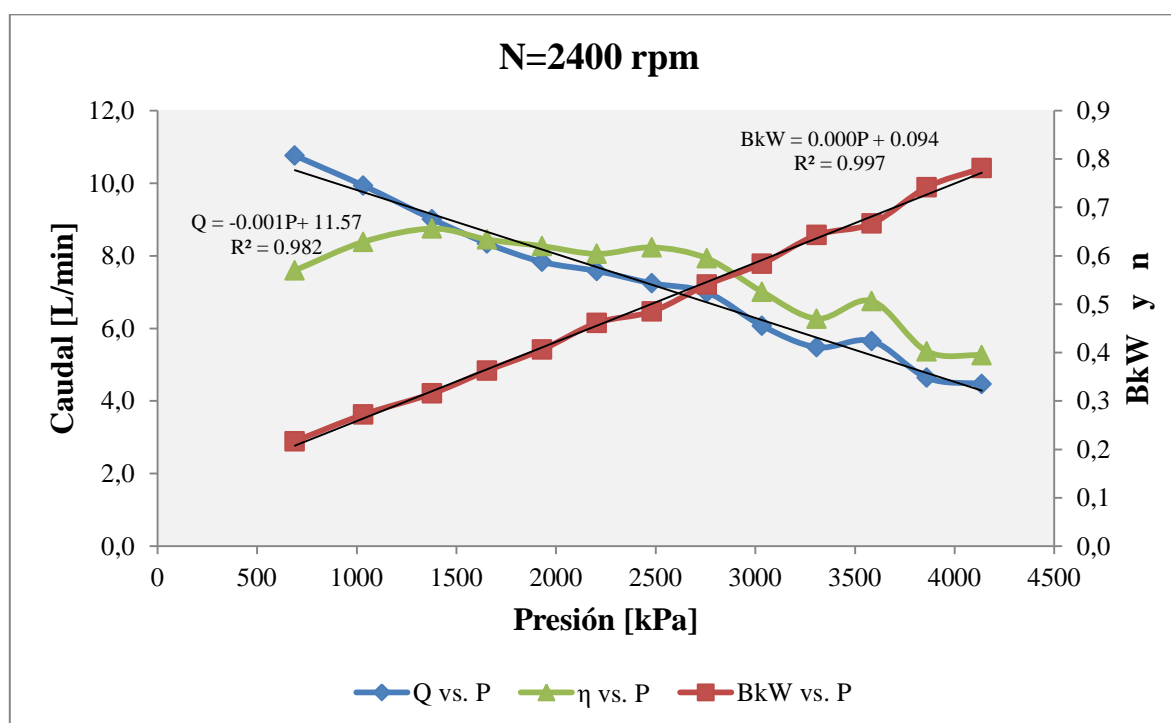


Tabla 27. Tabla de resultados para la bomba de engranajes externos, operando a una velocidad de 2400 rpm

N=2400 rpm							
P [kPa]	Q [m ³ /s]	Q [L/min]	F [N]	T [N.m]	BkW	FkW	η
689	1,79E-04	10,76	5,40	0,86	0,22	0,12	0,57
1034	1,66E-04	9,93	6,77	1,08	0,27	0,17	0,63
1379	1,50E-04	9,01	7,85	1,26	0,32	0,21	0,66
1655	1,39E-04	8,34	9,03	1,44	0,36	0,23	0,63
1931	1,31E-04	7,83	10,10	1,62	0,41	0,25	0,62
2206	1,26E-04	7,58	11,48	1,84	0,46	0,28	0,60
2482	1,21E-04	7,24	12,07	1,93	0,49	0,30	0,62
2758	1,17E-04	6,99	13,44	2,15	0,54	0,32	0,59
3034	1,01E-04	6,07	14,52	2,32	0,58	0,31	0,53
3309	9,13E-05	5,48	15,99	2,56	0,64	0,30	0,47
3585	9,42E-05	5,65	16,58	2,65	0,67	0,34	0,51
3861	7,73E-05	4,64	18,44	2,95	0,74	0,30	0,40
4137	7,45E-05	4,47	19,42	3,11	0,78	0,31	0,39

Figura 67. Curvas características de la bomba de engranajes externos a una velocidad de rotación de 2200 rpm



4.3 VALIDACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA DE ENGRANAJES EXTERNOS

Para determinar la validez del comportamiento de las curvas características obtenidas en el punto anterior, estas curvas se compararon con el comportamiento de unas curvas características típicas de una bomba de desplazamiento positivo de tipo rotativo mostrado en la figura 1.

4.3.1 Análisis de la curva Caudal contra Presión. Al observar la figura 4, se encuentran dos graficas de Caudal contra Presión, una teórica en que la pendiente es cero, dado que teóricamente el volumen movido por una bomba de desplazamiento positivo es constante, y la otra experimental con pendiente negativa, mostrando que en la realidad existen unas pérdidas de caudal tal y como se analizó en el capítulo 2 mediante la expresión (2.4).

Al analizar las curvas de caudal contra presión de las figuras 64, 65, 66 y 67 se puede observar que:

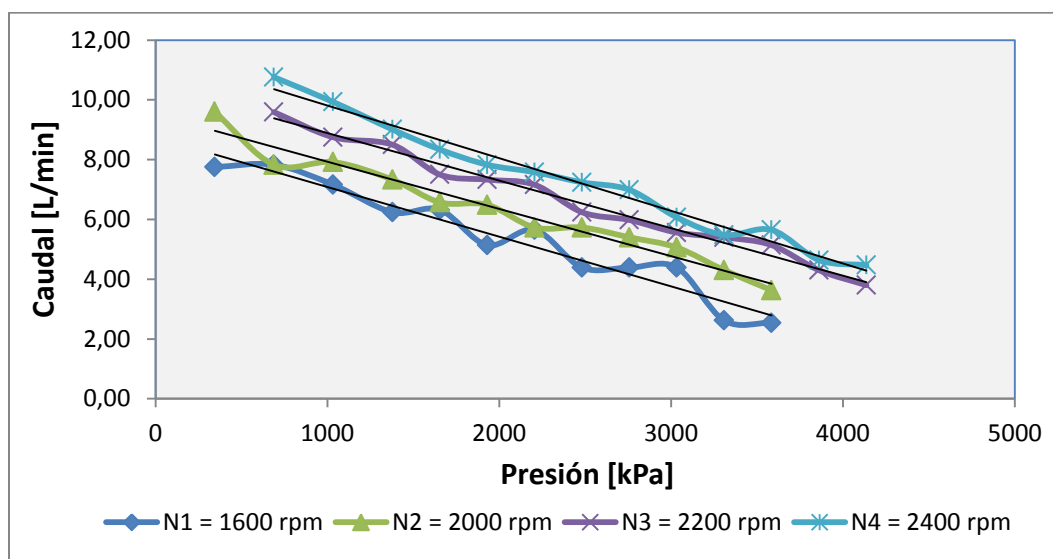
- El comportamiento dado entre estas dos variables es el que se esperaba, los trazos tienden a ser líneas rectas con pendiente negativa.
- La bomba está presentando altas pérdidas de caudal, evidenciando que la bomba no está operando de la forma deseada. En la tabla 27 se muestran los valores de caudal según la velocidad de rotación a la que está trabajando la bomba; y tomando como referencias los valores de presión de 689 kPa y 3585 kPa se puede obtener una pérdida de caudal entre los 4 L/min y 5 L/min.

Tabla 28. Comparación de caudales entre dos rangos de presión

N [rpm]	(@ 689 kPa) Q [L/min]	(@ 3585 kPa) Q [L/min]	Pérdida de Q [L/min]
1600	7,83	2,54	5,29
2000	7,83	3,63	4,20
2200	9,59	5,14	4,45
2400	10,76	5,65	5,11

- En la figura 4 también se muestra que a medida que la velocidad de rotación aumenta, el caudal entregado por la bomba es mayor. Para validar esto en las pruebas realizadas, se trazaron las curvas de caudal contra presión para las 4 velocidades de rotación trabajadas. La figura 68 muestra que este comportamiento se cumple para los valores obtenidos con el sistema de adquisición de datos en las pruebas del banco hidráulico.

Figura 68. Curvas de caudal contra presión para diferentes velocidades de rotación



- Analizando los ajustes lineales mostrados en la tabla 29, se observa que la pendiente de las 4 rectas es la misma, evidenciándose una tendencia de disminución constante del caudal a medida que la presión aumenta y la velocidad de rotación disminuye.

Tabla 29. Expresiones de la línea de tendencia para las curvas de Caudal contra Presión

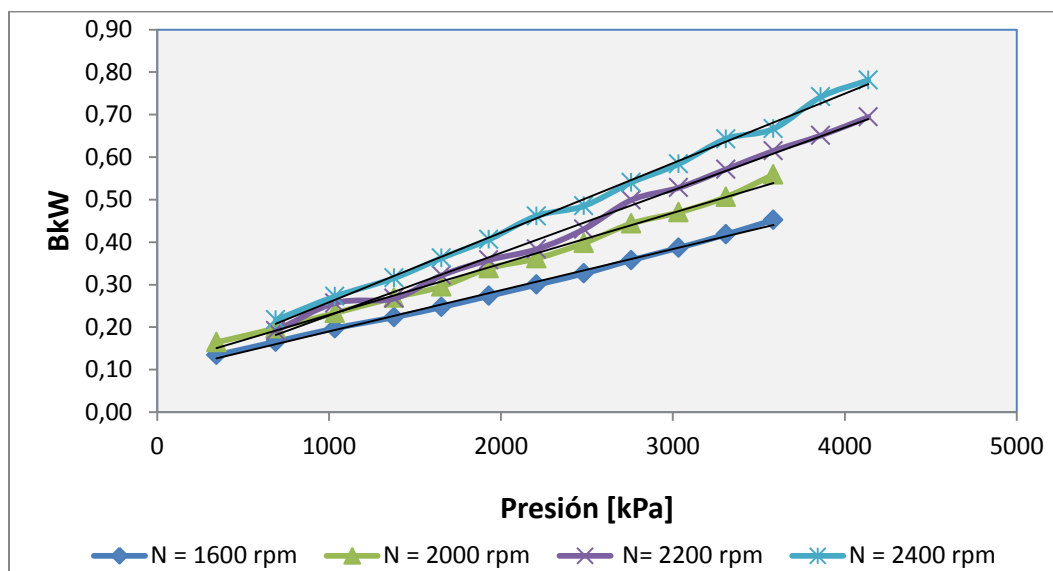
N [rpm]	Expresión para la línea
1600	$Q = -0,001 P + 8,749$
2000	$Q = -0,001 P + 9,508$
2200	$Q = -0,001 P + 10,47$
2400	$Q = -0,001 P + 11,57$

4.3.2 Análisis de la curva Potencia contra Presión. Para el caso de la curva de Potencia contra Presión, la figura 1 muestra que las curvas teóricas presentan un comportamiento ascendente en la medida que la presión de descarga de la bomba aumenta.

Para rangos medios de presión la curva tiende a comportarse como una línea recta, validando así las curvas de Potencia contra Presión mostradas en las figuras 64, 65, 66 y 67. Se habla de rangos medios de presión, porque en las pruebas del sistema de adquisición de datos se trabajaron a presiones entre los 50 psi y 600 psi (345 kPa y 4137 kPa), que es el rango que permite trabajar el banco hidráulico, puesto que para alcanzar una presión mayor, es necesario aumentar la velocidad de rotación, y si eso se hace, se forma mucha turbulencia en la succión de la bomba, ocasionando cavitación.

Al igual que con la curva de caudal contra presión, la curva de potencia contra presión muestra que a medida que la velocidad de rotación aumenta, la potencia entregada por la bomba es mayor. Para validar esto, se trazaron adicionalmente, las curvas de potencia contra presión para las 4 velocidades de rotación como se muestra en la figura 69.

Figura 69. Curvas de Potencia contra Presión para diferentes velocidades de rotación



Al observar las ecuaciones de recta que arrojan las líneas de tendencia de la tabla 29, se nota una gran proximidad entre las pendientes de las 4 gráficas. La pendiente para la recta correspondiente a la velocidad de 1600 rpm es la menor de las 4, y esto se justifica desde el punto de vista de la demanda de potencia; por lo mismo, cada valor de pendiente aumenta en la medida que lo hace la velocidad de rotación.

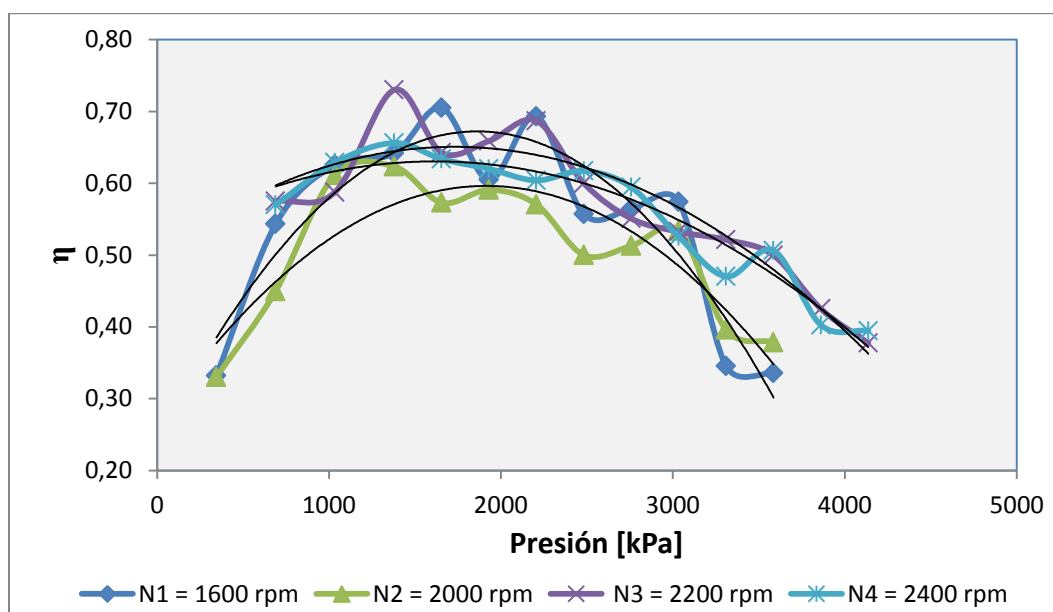
Tabla 30. Expresiones de la línea de tendencia para las curvas de Potencia de accionamiento contra Presión

N [rpm]	Expresión para la línea
1600	$BkW = 0,00010 P + 0,09350$
2000	$BkW = 0,00012 P + 0,10891$
2200	$BkW = 0,00015 P + 0,08029$
2400	$BkW = 0,00016 P + 0,09478$

4.3.3 Análisis de la curva Eficiencia contra Presión. La curva teórica de Eficiencia contra Presión se puede observar en la figura 17 como eficiencia conjunta. *Mott* en su texto “Mecánica de fluidos” [23] muestra como la eficiencia alcanza un valor aproximado del 75% a una presión de 700 psi y luego esta eficiencia se vuelve muy constante (sin llegar al 90 %) entre el rango de presiones de 700 psi y 2000 psi.

Tal y como se mencionó en la sección 4.3.2, las pruebas del sistema de adquisición de datos se realizaron a presiones entre los 50 psi y 600 psi, rango que permite trabajar el banco hidráulico, por lo que, según las curvas teóricas, los datos tomados están dentro del rango de presiones en los que la eficiencia presenta su tendencia al aumento, pero al analizar las curvas experimentales, figura 70, se observa que a partir de los 290 psi (aproximadamente 2000 kPa) la eficiencia decae. Esta diferencia entre las curvas teóricas y experimentales de Eficiencia contra Presión, se dan, debido a las pérdidas volumétricas ya mencionadas, recordando que la eficiencia depende directamente del caudal.

Figura 70. Curvas de Eficiencia contra Presión para diferentes velocidades de rotación



Al igual que para las curvas de Caudal y Potencia contra Presión, se trazaron las líneas de tendencia para cada curva de eficiencia, y se obtuvieron las expresiones para estas. Dichas expresiones tienen una tendencia muy similar entre sí, tal como lo registra la información de la tabla 31.

Tabla 31. Expresiones de la línea de tendencia para las curvas de Eficiencia contra Presión

N [rpm]	Expresión para la línea
1600	$\eta = -0,00000001P^2 + 0,0004646 P + 0,2397340$
2000	$\eta = -0,00000001P^2 + 0,0003405P + 0,2703492$
2200	$\eta = -0,00000005P^2 + 0,0001719 P + 0,5020321$
2400	$\eta = -0,00000004P^2 + 0,0001314 P + 0,4242021$

4.4 DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES K1 Y K2 A PARTIR DE LOS DATOS TOMADOS EN EL BANCO HIDRÁULICO

Haciendo uso de la herramienta *Solver* de Microsoft Excel (2007) [21] y reemplazando los datos de velocidad de rotación, caudal y presión de las tablas 20, 21, 22 y 23 en la fórmula (2.11) de caudal real de una bomba de desplazamiento positivo rotativa, se obtuvieron las constantes K1 y K2 para cada punto. En la tabla 32 se muestra ya el promedio obtenido para cada una de las constantes, en cada una de las 4 velocidades de operación de la bomba, demostrándose que realmente los valores son constantes.

Tabla 32. Valores de las constantes K1 y K2 para el caudal real de la bomba de engranajes externos

N [rpm]	K1	K2
1600	0,0041	0,0005
2000	0,0038	0,0006
2200	0,0037	0,0006
2400	0,0038	0,0006
Promedio	0,0039	0,0006

5. ELABORACIÓN DE MANUAL DE OPERACIÓN PARA EL BANCO HIDRÁULICO

Figura 71. Identificación de algunos elementos del banco hidráulico



1	Sistema basculante (celda de carga)	4	Válvula reguladora de flujo
2	Manómetro de Bourdon	5	Sensor de flujo
3	Bomba de engranajes externos	6	Motor basculante

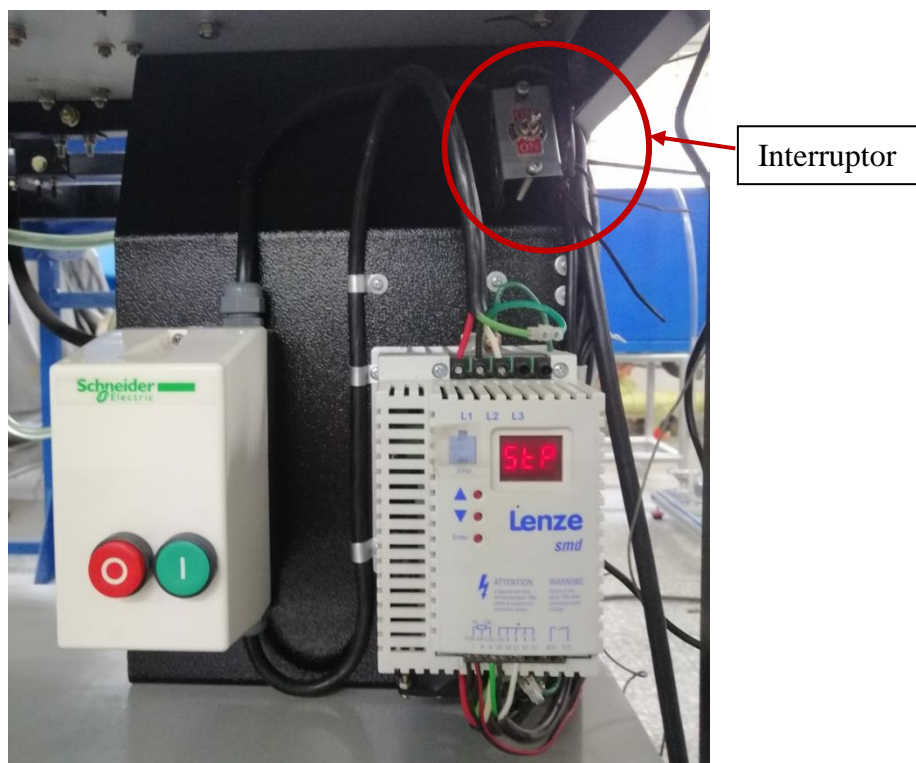
1. Realizar las conexiones eléctricas necesarias. Conecte el módulo de control (la caja negra ubicada detrás del variador) y el banco hidráulico a la red eléctrica.
2. Abrir completamente la válvula reguladora de flujo (elemento 4 de la figura 70).
3. Verificar que el eje de la celda de carga (figura 71) se encuentre alineado con el tornillo que ejerce presión sobre ella.

Figura 72. Sistema basculante (celda de carga)



4. Ajustar el tornillo moleteado (grafilado, figura 71) del sistema basculante para evitar que exista contacto entre los brazos del motor y la celda de carga cuando inicie el giro del motor¹.
5. Verificar que el depósito de aceite contenga el volumen de fluido requerido².
6. Verificar que el interruptor del variador de frecuencia este en posición “OFF” (figura 73) y oprimir el pulsador de encendido del contactor eléctrico (botón verde figura 73).

Figura 73. Variador de frecuencia y contactor eléctrico



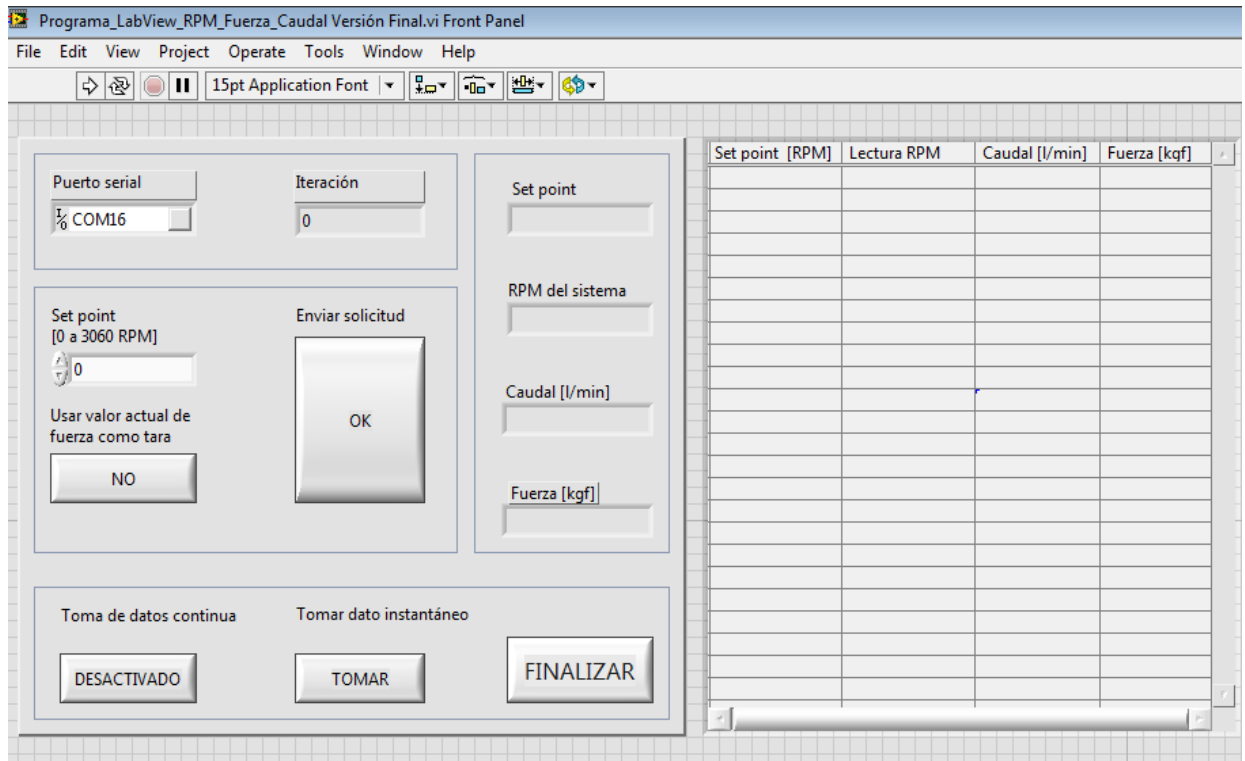
7. La pantalla del variador de frecuencia debe mostrar la palabra “OFF”.
8. Posicionar el interruptor del variador (figura 73) en “ON”. La pantalla del variador de frecuencia debe mostrar la palabra “SEP”.
9. Conectar el cable USB que es el encargado de la comunicación entre el computador y el microcontrolador.

¹ Previo a alcanzar la velocidad mínima de rotación, se presentan vibraciones que pueden generar daños en la celda de carga.

² 70% del volumen total del depósito como mínimo.

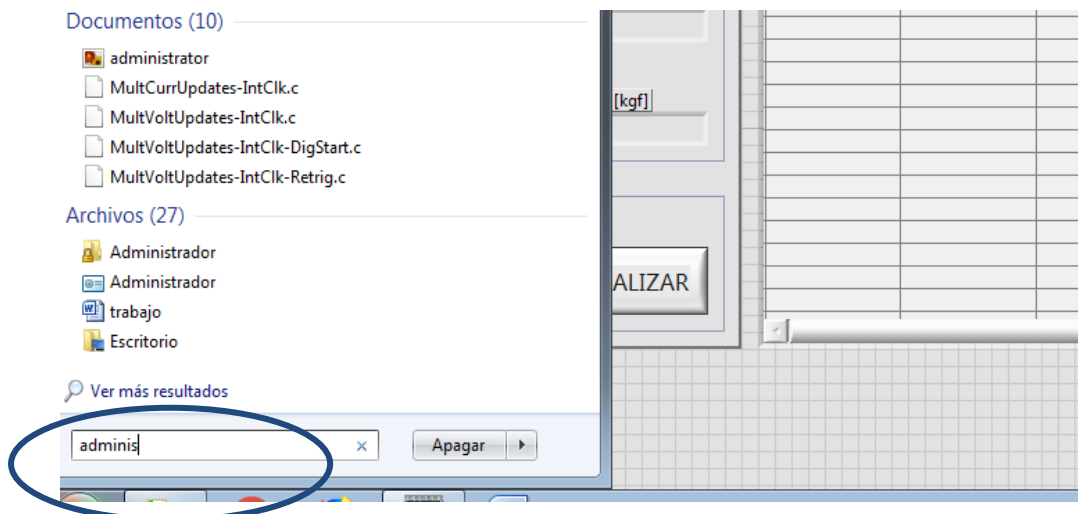
10. Abrir la carpeta “BDP” ubicada en el escritorio de Windows, allí encontrará la aplicación de *LabVIEW* [18]; al iniciarla se verá la interfaz gráfica mostrada en la figura 73

Figura 74. Pantalla inicial del sistema de adquisición de datos



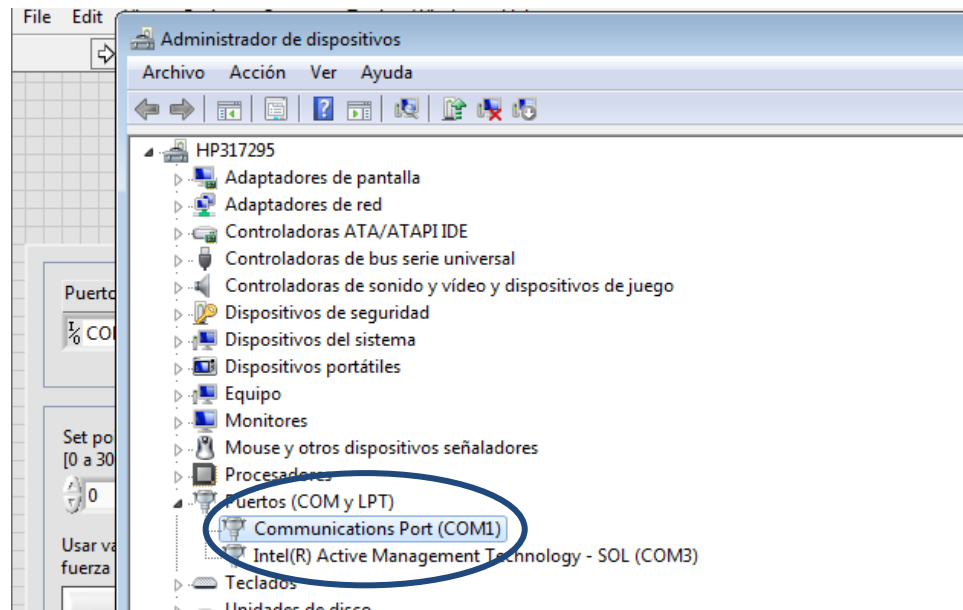
11. En el buscador del escritorio, escriba la palabra “administrador” (figura 75)

Figura 75. Buscador



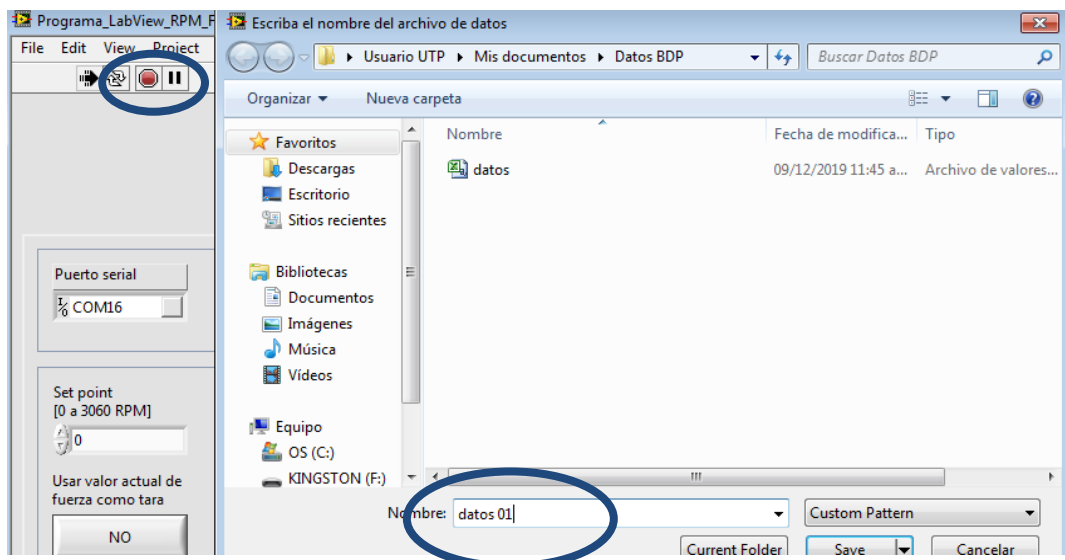
12. En la figura 76 se observa la ventana de administrador de dispositivos. Seleccione puertos (COM y LPT) y verifique que haya comunicación con el ARDUINO “communications Port (COM)”

Figura 76. Verificación de la comunicación Microcontrolador-computador



13. En la interfaz gráfica de la figura 77, en la esquina superior izquierda, verá una “flecha” negra. Seleccionando este botón aparecerá un cuadro de diálogo en el que puede elegir la carpeta en la que quedará guardada la información. Nombre su archivo de datos.

Figura 77. Ubicación y nombre del archivo



14. En el indicador numérico (7) de la figura 78, escriba el valor de la velocidad de rotación a la cual desea trabajar la bomba. Este valor deberá estar entre 1500 RPM y 2600 RPM (valores de velocidad a los que la bomba opera satisfactoriamente).

Figura 78. Ingreso del valor de la velocidad de rotación

The screenshot shows a software interface for pump control. It includes several input fields and buttons. Numbered callouts are as follows:

- 1: Iteración field (value: 76856)
- 1: OK button
- 1: DESACTIVADO button (under Toma de datos continua)
- 1: TOMAR button (under Tomar dato instantáneo)
- 7: Set point input field (value: 2000)
- 8: RPM del sistema field
- 9: Caudal [l/min] field
- 10: Fuerza [kgf] field

Other visible elements include: Puerto serial (COM16), Set point [10 a 3060 RPM], Usar valor actual de fuerza como tara, and a table on the right with columns: Set point [RPM], Lectura RPM, and Caudal.

15. Oprimir “OK” (botón numerado con 13 en la figura 78), de esta forma está enviando la información al microcontrolador.
16. Una vez se alcance el valor de la velocidad de rotación seleccionado (este valor se verá reflejado en el indicador “RPM del sistema” (8 de la figura 78)) y se observe que la vibración del equipo se ha estabilizado, aflojar el tornillo moleteado para permitir que el brazo ejerza presión sobre la celda de carga. Ahora el recuadro “Fuerza” (10 de la figura 78) debe estar mostrando el valor que el brazo del motor ejerce sobre la celda de carga.
17. Cierre la válvula de regulación de flujo (figura 71), hasta que el manómetro de descarga indique el valor de presión³ a la que se desea trabajar la bomba. Debe esperar unos

³ Recuerde que una bomba produce movimiento del líquido (caudal), las bombas no generan presión; pero la presión en el sistema, es realmente resultado de la resistencia al flujo.

segundos a que el sistema regule el valor de velocidad de rotación (debe aparecer en “RPM del sistema (8)”, el valor ingresado en el numeral 14). El registro del valor de la presión de trabajo se hace manualmente y es un valor que debe tener en cuenta para el posterior procesamiento de datos.

- 18.** Ahora ya se pueden tomar los valores de caudal y fuerza. Esto puede hacerse de dos maneras; una será continua (“botón 12” de la figura 78) en la cual se registrarán “n” valores, hasta el momento que se detenga esta medición. La otra es una toma instantánea (“botón 11” de la figura 78), en la que solo se registra una toma de información cada vez que se oprime el botón.
- 19.** Repetir los pasos 17 y 18 hasta obtener los datos a las diferentes presiones con las que desea construir las curvas de operación de la bomba.
- 20.** Para obtener datos para una velocidad de rotación diferente, deberá repetir el procedimiento desde el paso 14.
- 21.** Si ya no se van a tomar más datos, ajustar el tornillo moleteado (separarlo de la celda) para evitar que la celda de carga haga contacto con el brazo del motor al disminuir la velocidad.
- 22.** Escribir en valor de 0 RPM en el recuadro de velocidad (7, figura 78). Al ingresar el valor de 0 RPM el motor parará.
- 23.** Seleccione “finalizar”. En ese momento ya puede acceder al archivo en el que quedaron los datos registrados. Este archivo tendrá una extensión (*.csv); para poder modificar u operar los datos, el archivo debe ser grabado en un archivo con extensión *.xlsx (Puede ser Microsoft Excel)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del trabajo de grado realizado se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- Se definió la arquitectura de control que permitió automatizar el banco de pruebas para la bomba de desplazamiento positivo (BDP), consiguiendo fijar la velocidad de rotación de tal forma que al registrarse un cambio en ésta, de manera automática el variador aumente o disminuya su frecuencia hasta llegar al valor inicialmente fijado.
- Se seleccionaron los componentes que cumplieron con los requerimientos para el sistema de control según la arquitectura definida para la automatización del banco hidráulico.
- Se integraron los componentes seleccionados como fueron: el sensor de flujo, el encoder incremental, y el sistema de adquisición de datos al banco hidráulico, permitiendo con esto obtener el valor de la señal de las variables involucradas en el proceso de caracterización de la bomba de engranajes externos.
- A partir de los conocimientos teóricos adquiridos en el curso de potencia fluida e hidráulica y electrohidráulica, se obtuvieron los modelos matemáticos del caudal real y del torque para una bomba de desplazamiento positivo rotativa, en estado transitorio.
- Fue necesario caracterizar el sensor de flujo y de la celda de carga para validar las señales sensadas por estos 2 instrumentos.
- Se creó un aplicativo de software, usando LabVIEW, que facilita el manejo del banco y permite obtener los datos sistematizados, para de una vez poderlos exportar a una hoja de cálculo y allí terminar el proceso matemático necesario para obtener las curvas características de la bomba.
- Se realizaron las pruebas en el banco hidráulico, concluyendo que:
 - El sistema de control funciona de la manera esperada, al modificar la presión de descarga, el variador de forma automática aumenta o disminuye la frecuencia hasta llegar al valor prefijado con un error de ± 70 rpm.
 - Al comparar los valores sensados con el medidor de flujo y con el flujómetro del equipo, se obtienen diferencias mínimas, excepto cuando el caudal es muy bajo donde ya se presenta el fenómeno de zona muerta del flujómetro.
 - Las curvas características de la bomba presentan el comportamiento teórico esperado.

- Hay una alta pérdida volumétrica en la bomba de engranajes externos (entre 4 L/min y 5 L/min), lo que evidencia que ésta requiere revisión. Es de aclarar, que la bomba de engranajes externos, es de segunda mano y aunque Torres [32] realizó una inspección detallada y un mantenimiento adecuado antes de su montaje, las pruebas realizadas en el banco permiten evidenciar que no está en las condiciones esperadas.
- Se deja un manual de operación para el banco hidráulico.

Como recomendaciones surgen las siguientes:

- Revisar la bomba de engranajes para determinar cuál es la causa de la pérdida volumétrica que está presentando.
- Ya que el banco inicialmente fue diseñado y construido para trabajar con una bomba de desplazamiento positivo de aspas deslizantes, se sugiere cambiar la bomba de engranajes por ésta, y probar el sistema de control y de adquisición de datos.
- Se propone mirar la posibilidad, puede ser mediante un trabajo de grado, de dotar al banco de un sistema de refrigeración que permita mantener la viscosidad del aceite constante.
- Se sugiere mirar el módulo de compresibilidad del aceite en el banco, y cómo afecta éste a los elementos del mismo y a las mediciones realizadas en él.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] American National Standards Institute [ANSI / (NFPA) T3.9.17 R1-1990] Hydraulic fluid power - positive displacement pumps, motors, and integral transmissions - method of testing and presenting basic performance data.
- [2] ----- [ANSI/(NFPA)T3.9.33-1997] Hydraulic Fluid Power - Pumps - Method Of Testing And Presenting Basic Performance Data For Load Sensing Pumps
- [3] ARANGO RIOS, Johan Sebastián; SOTO LOPERA, Jhony Heriberto. Diseño y construcción de un banco hidráulico con bomba de desplazamiento positivo rotativa para el Laboratorio de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, 2014. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- [4] ARANGO RIOS, Johan Sebastián; MUSTAFÁ I., Yamal; SOTO LOPERA, Jhony Heriberto. Curso experimental de Fluidos y Máquinas Hidráulicas: Bomba de Aspas deslizantes. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [5] BLACKBURN, John F.; REETHOF, Gerhard; SHEARER, J. Lowen. Fluid power control. The Massachusetts Institute of Technology. United States of America, 1969. 710 p.
- [6] Carrod electrónica. Amplificador operacional. Disponible en: <https://www.carrod.mx/products/lm741-amplificador-operacional>
- [7] CHEN, F., & YAN, G. Design of automatic hydraulic test bench based on LabVIEW.in: 2011. Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng. MACE 2011 - Proc., IEEE: 1183–1186. (2011).
- [8] CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 8 ed. España: Alfaomega, 2010.
- [9] DOEBELIN, Ernert. Measurement Systems Application and Design. 4 ed. Prentice Hall. 1990. 984 p.

[10] E-tools. CARACTERÍSTICAS DEL ARDUINO MEGA 2560. Disponible en: <https://www.electrontools.com/Home/WP/2018/06/19/arduino-mega-2560-caracteristicas/>

[11] ELSHORBAGY, Kamel; KANDIL, Hamdy; LATIF, Mina. Development of a Multi-functional Hydraulic Test Stand. En: The Journal of Scientific and Engineering Research. Volumen 5. 2018

[12] GUTIÉRREZ, Marllelis; ITURRALDE, Sadi. Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control. Serie de textos académicos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad estatal Península de Santa Elena. Ecuador 2017. 137p.

[13] HAMID, Hussain. Development of a Hydraulic Trainer Bench. M.Sc. Thesis, Faculty of Engineering, Khartoum University, Sudan, 2009. Thesis, Faculty of Engineering, Khartoum University, Sudan.

[14] HENAO C. Edison, MONROY J. Mauricio. Diseño y construcción de un banco de pruebas para bombas hidráulicas de desplazamiento positivo para potencias hasta de 7 kW. Pereira, 2005. Trabajo de grado (Magister en Sistemas Automáticos de Producción. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica

[15] HOYOS M. Mario. Apuntes curso potencia fluida., Maestría en Sistemas Automáticos de Producción. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007.

[16] Ingeniería Mecafenix. Encoder. ¿Cómo función? Y sus tipos. Disponible en: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/encoder/>

[17] KARASSIK, Igor et al. Manual de Bombas. Colombia: McGraw-Hill, 1983. 1176 p.

[18] LENZE AC TECH CORPORATION. Catálogo: Instrucciones de funcionamiento variador de frecuencia SMD [en línea]. <Lenze.com>

[19] MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. 2ª ed. México: Harla, 1982. 660 p.

[20] MICHELSON, Shane; MUELLER, Muller; SCHURMAN, Brett. Hydraulic Test Bench Circuit Construction, Testing, and Analysis. En: The journal of Undergraduate Research. South Dakota State University. Volumen 10, artículo 9. 2012.

[21] Microsoft. Excel ® (2007). Microsoft Corporation.

[22] Minitab 19® [software]. Available online: <https://www.minitab.com/es-mx/downloads/> (accessed on november 2019)

[23] MOTT, Robert. Mecánica de Fluidos. 6 ed. México: Prentice Hall, 2006. 628 p.

[24] National Instruments Corporation. Labview ® [Software] (2015).

[25] naylamp- mechatronics. Transmisor de celda de carga. Diponible en: <https://naylampmechatronics.com/sensores/147-modulo-hx711-transmisor-de-celda-de-carga.html>

[26] OGATA, K. Ingeniería de control moderna. 5 ed. Prentice Hall, España 2010

[27] PARKER. ParkerStore: Soluciones y servicios hidráulicos y neumáticos [en línea] <Parker.com>

[28] Processing Development Environment (PDE) [Software] (3.5.3). Disponible en: <https://processing.org/>

[29] RUIZ, Cesar. Trasmisión por correas: Unidad 2. Elementos de trasmisión. Disponible en: <http://files.cesarruiz.webnode.com.co/200000095-5b7204f2/TransmisionPorCorreas.pdf>

[30] Sapiensman. Conceptos básicos de neumática e hidráulica. Disponible en: http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica9.htm

[31] SCHNEIDER ELECTRIC. Catálogo: Hoja de características del producto LC1D09BD [en línea] <<https://www.se.com/co/es/about-us/company-profile/schneider-colombia.jsp>>

[32] TORRES Colorado, Juan Camilo. Adecuación del banco de pruebas de bomba de desplazamiento positivo del Laboratorio de Fluidos y Máquinas Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de Pereira para realizar pruebas con una bomba de engranajes externos. Pereira, 2019. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica.

[33] Vistronica. Sensor de flujo efecto Hall. Tienda virtual de electrónica. Disponible en <https://www.vistronica.com/content/category/como-comprar>

[34] WARRING, R.H. Selección de Bombas- Sistemas y Aplicaciones. España: Labor, 1977. 362 p.

[35] WATTON, John. Fluid power system: Modeling, simulation, analog and microcomputer control. First edition. U.K: Prentice Hall, 1989. 487p.

ANEXO A

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL ARDUINO

```

#include "HX711.h"

#define DOUT A1
#define CLK A0

String escala="0";
String otro="0";
int tara=0;
boolean activar_tara=0;
int i = 0;
float Fuerza;
HX711 balanza(DOUT, CLK);

volatile unsigned int pulsos_conteo; // Variable que lleva la cuenta de los pulsos recibidos
por el encoder
float rpm=0; // Variable que calcula las rpm
long tiempo_inicio; // Almacena el valor de tiempo inicial para la ventana de muestreo
long tiempo_actual; // Almacena el valor de tiempo final para la ventana de muestreo
int cuenta; // Variable que permite definir el momento para enviar el dato por el puerto
serial
String comando_entrada="0"; // Cadena que entra por el puerto serial
String set_point="0"; // set point inicia en cero
float vlr_set_point=0; // valor de set point inicia en cero
float setp=0;
int digPin = 6; // pin digital 6
int n=0;

volatile unsigned int pulsos_caudal; // Variable que lleva la cuenta de los pulsos recibidos
por el encoder
float caudal=0; // Variable que calcula las rpm
long t_inicio; // Almacena el valor de tiempo inicial para la ventana de muestreo
long t_actual; // Almacena el valor de tiempo final para la ventana de muestreo
int conteo; // Variable que permite definir el momento para enviar el dato por el puerto
serial

// Función que atiende interrupción caudal
void caudal_fun()
{

    //Actualiza conteo
    pulsos_caudal++; // incrementa su valor en 1
}

```



```

// Función que atiende interrupción encoder
void rpm_fun()
{

    //Actualiza conteo
    pulsos_conteo++; // incrementa su valor en 1
}

// Configuración inicial
void setup()
{

    Serial.begin(9600); // inicializa el puerto serial

    balanza.set_scale(); // Establecemos la escala
    balanza.set_gain(128);
    balanza.tare(20); //El peso actual es considerado Tara.
    delay(500);

    //La interrupción 0 es en el pin digital 2
    //Flanco de bajada FALLING (de ALTO a BAJO) o RISING ( de BAJO a ALTO)
    attachInterrupt(0, rpm_fun, RISING); // permite la interrupción

    // Inicializa las variables en cero
    pulsos_conteo = 0;
    rpm = 0;
    tiempo_inicio = 0;
    cuenta=0;

    attachInterrupt(1, caudal_fun, RISING); // permite la interrupción de caudal

    // Inicializa las variables en cero
    pulsos_caudal = 0;
    caudal = 0;
    t_inicio = 0;
    conteo=0;

}

// Programa principal
void loop() // Se ejecuta indefinidamente
{
    //Sección sensor caudal
    delay(100); // Ventana de toma de pulsos
    t_actual=micros(); // guarda en variable el tiempo actual tomado de la función micros()
}

```

```

//No procesa las interrupciones mientras calcula
detachInterrupt(1);

if (conteo==8) // Cuando cuenta sea igual a 4, calcula y envía las RPM por el puerto serial
{
  conteo=0; // Reinicia la variable cuenta
  //Calcula las RPM
  caudal = (0.7*(1000000*pulsos_caudal)/(t_actual - t_inicio))+1.7; //caudal en LPM

}

conteo++; // incrementa cuenta en 1
pulsos_caudal = 0; // Reinicia el conteo de pulsos
t_inicio = micros(); // Ahora, el tiempo de inicio es el tiempo actual dado por la función
micros()
//Reinicia interrupción
attachInterrupt(1, caudal_fun, RISING);

//Fin sección sensor caudal

//delay(100); // Ventana de toma de pulsos
tiempo_actual=micros(); // guarda en variable el tiempo actual tomado de la función
micros()
//No procesa las interrupciones mientras calcula
detachInterrupt(0);

//Sección encoder
if (cuenta==4) // Cuando cuenta sea igual a 4, calcula y envía las RPM por el puerto serial
{
  cuenta=0; // Reinicia la variable cuenta
  //Calcula las RPM
  rpm = (123000*pulsos_conteo)/(tiempo_actual - tiempo_inicio);
  //Serial.println(rpm); // Imprime el dato rpm en el puerto serial

}

  if(Serial.available()>0)
{ // verifica si el puerto serie está habilitado.

comando_entrada = Serial.readString();

activar_tara=1;

}

```

```

String escala= getValue(comando_entrada, ',', 0);
tara=escala.toInt();
if (tara==1 & activar_tara==1)
{
    activar_tara=0;
    balanza.tare(20);
}

Fuerza= balanza.get_units(2)*(-0.000000833);

String set_point = getValue(comando_entrada, ',', 1);

vlr_set_point= set_point.toFloat();
setp=vlr_set_point/12;

Serial.println((String) vlr_set_point + ',' + rpm + ',' + caudal + ',' + Fuerza );

if (rpm>vlr_set_point)
{
    n=n-1;
    if (n<=0)
    {
        n=0;
    }
    analogWrite(digPin,n); // Señal PWM a 50% en el PIN 10
}

if (rpm<vlr_set_point)
{
    n=n+1;

    if (n>=255)
    {
        n=127;
    }
    analogWrite(digPin,n); // Señal PWM a 50% en el PIN 10
}

//if (((rpm-setp<=100) && (rpm-setp>=-100)) || (rpm==setp))
if (rpm==setp)

```

```

{
    analogWrite(digPin,n); // Señal PWM a 50% en el PIN 10
}

cuenta++; // incrementa cuenta en 1
pulsos_conteo = 0; // Reinicia el conteo de pulsos
tiempo_inicio = micros(); // Ahora, el tiempo de inicio es el tiempo actual dado por la
función micros()
//Reinicia interrupción
attachInterrupt(0, rpm_fun, RISING);

//Fin sección encoder y control RPM
}

// Separa cada dato de la cadena que entra por el puerto serial

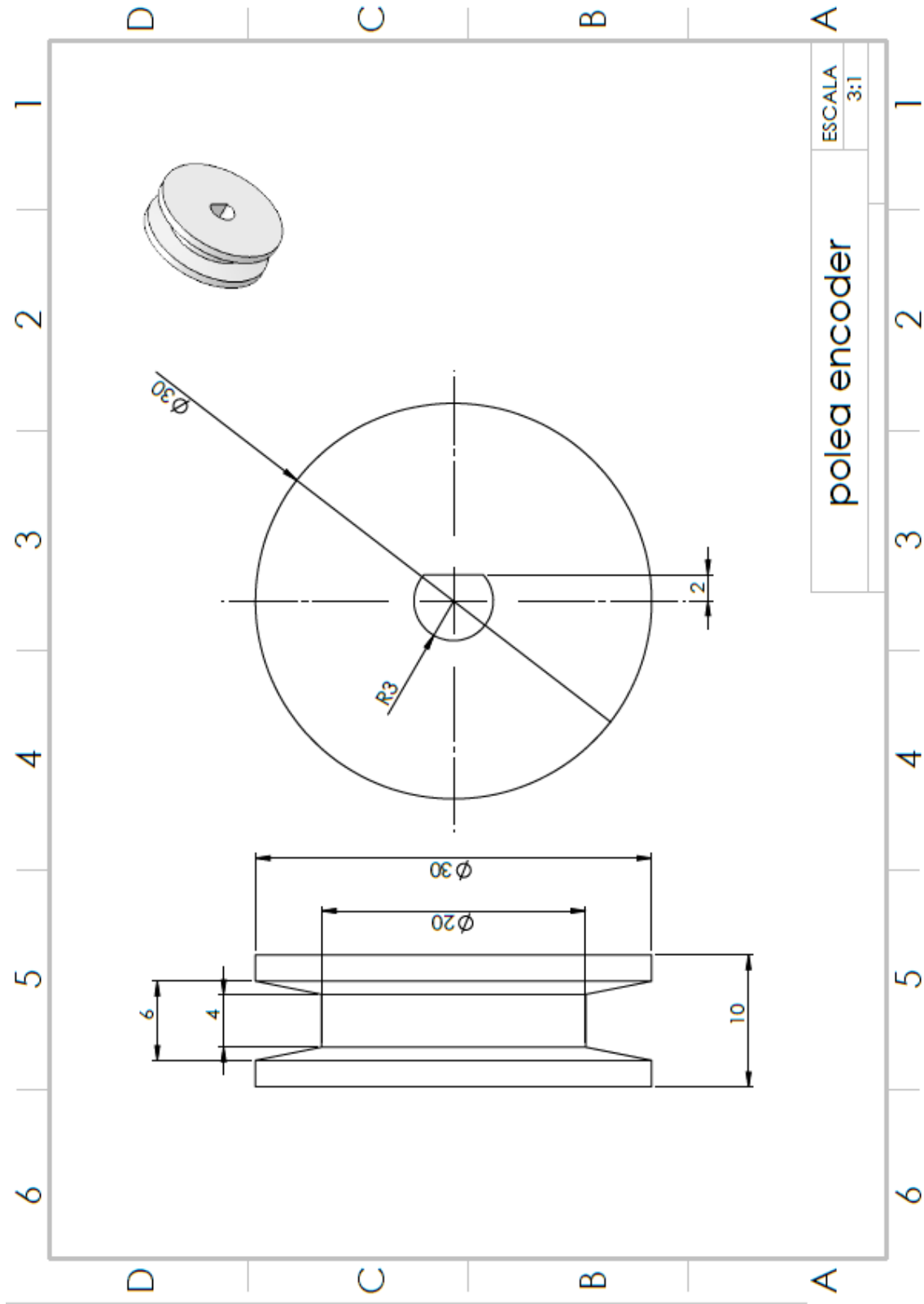
String getValue(String data, char separator, int index)
{
    int found = 0;
    int strIndex[] = {0, -1};
    int maxIndex = data.length()-1;

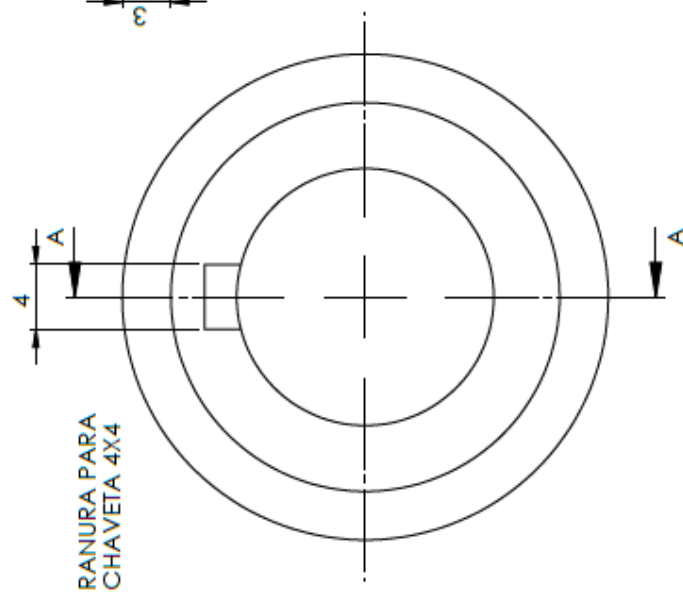
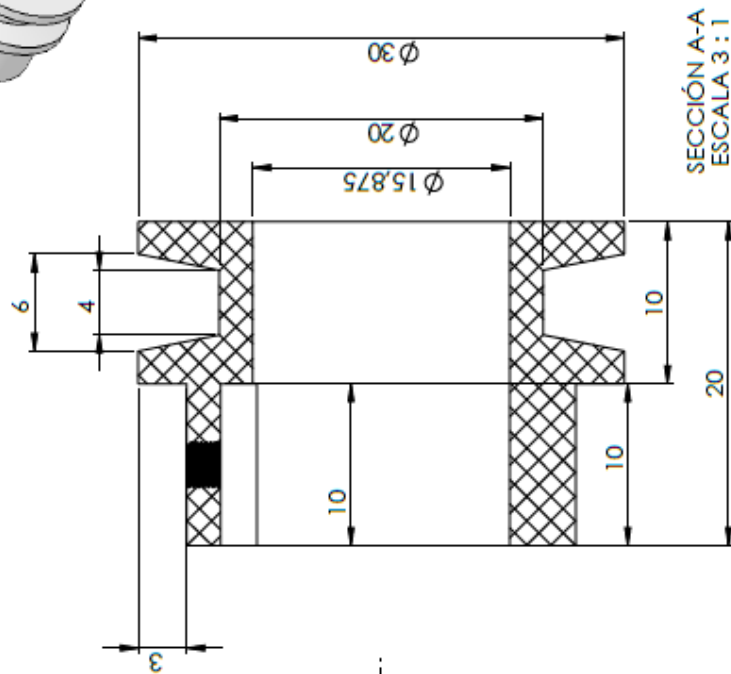
    for(int i=0; i<=maxIndex && found<=index; i++){
        if(data.charAt(i)==separator || i==maxIndex){
            found++;
            strIndex[0] = strIndex[1]+1;
            strIndex[1] = (i == maxIndex) ? i+1 : i;
        }
    }

    return found>index ? data.substring(strIndex[0], strIndex[1]) : "";
}

```

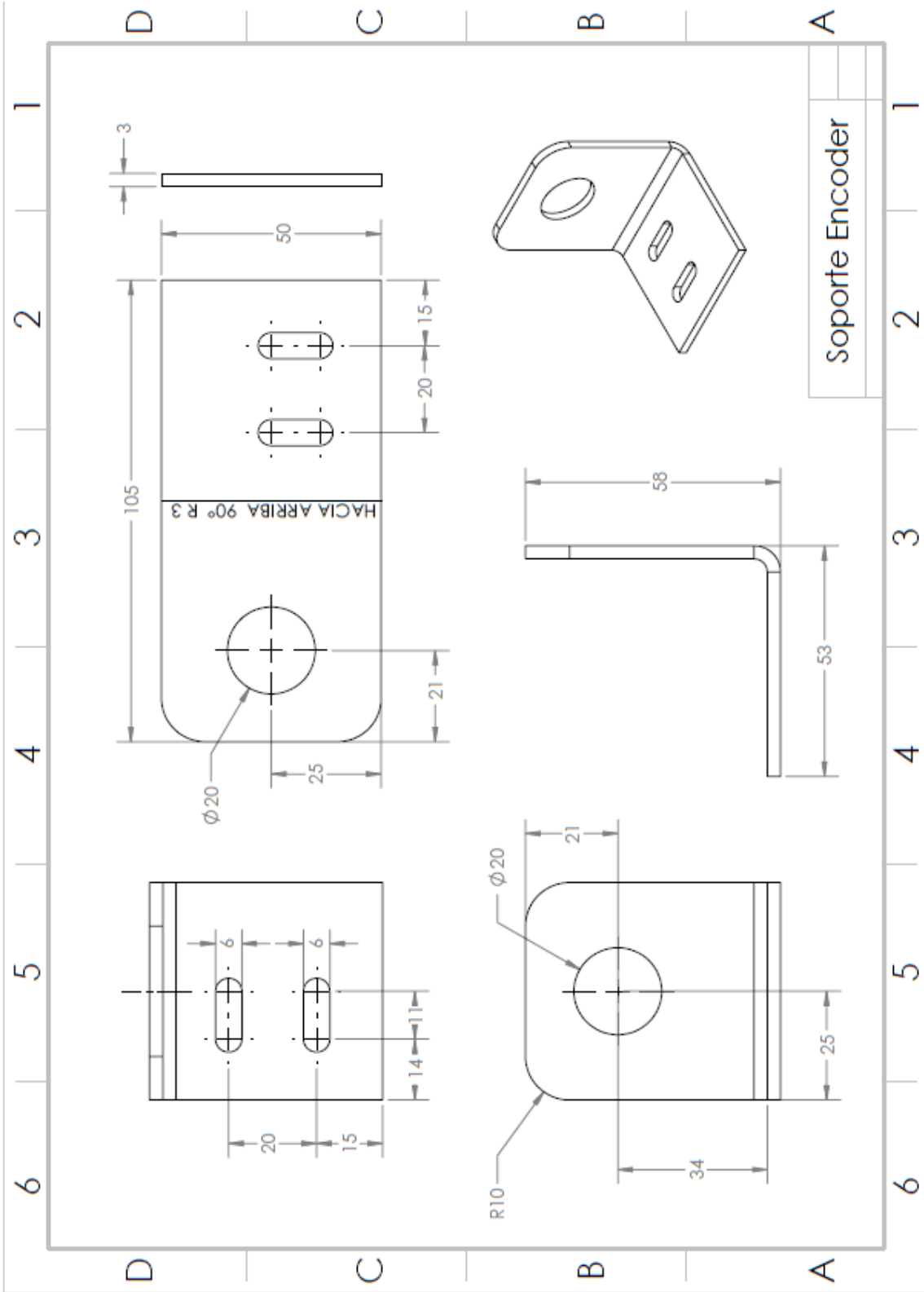
ANEXO B
PLANOS

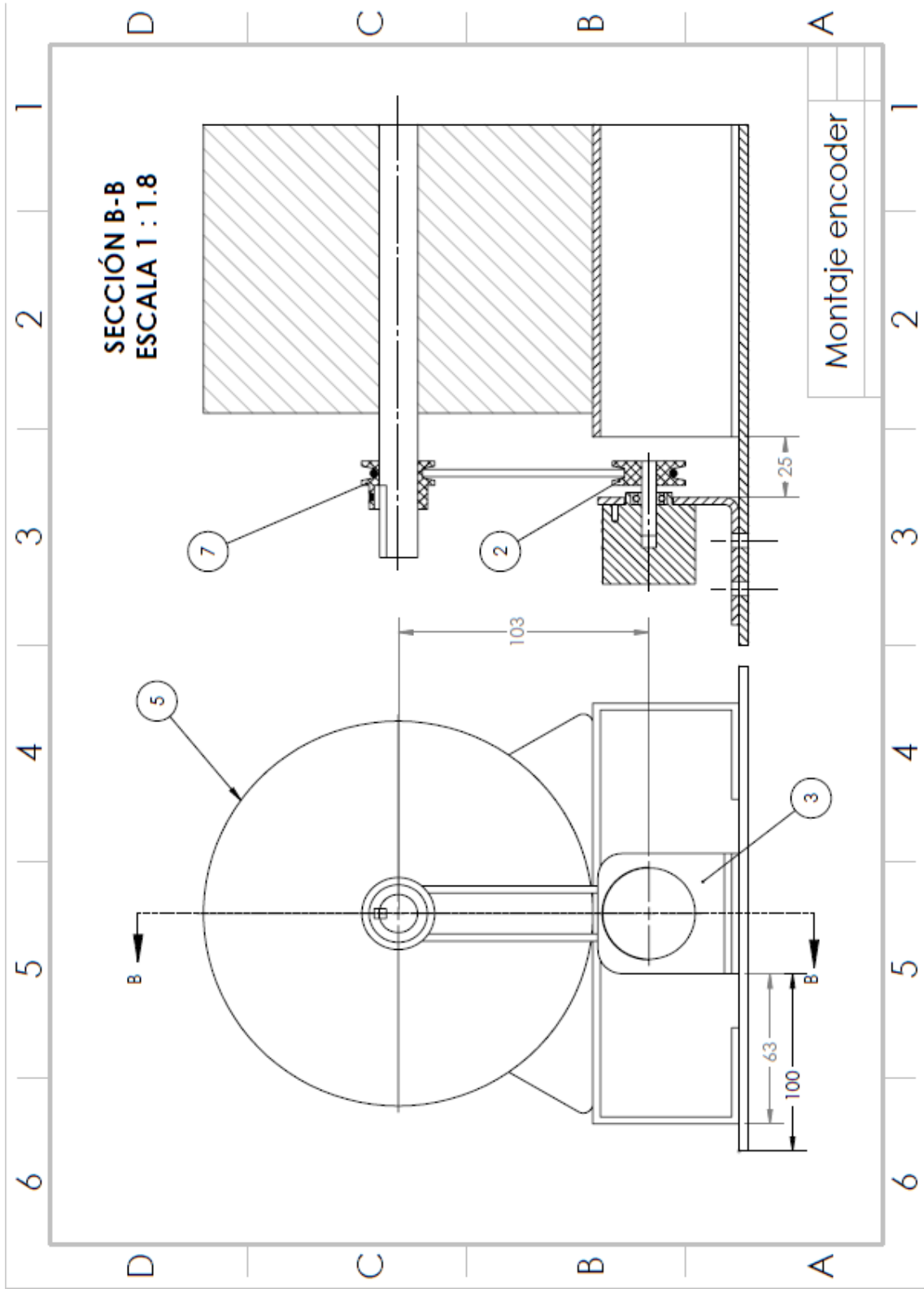


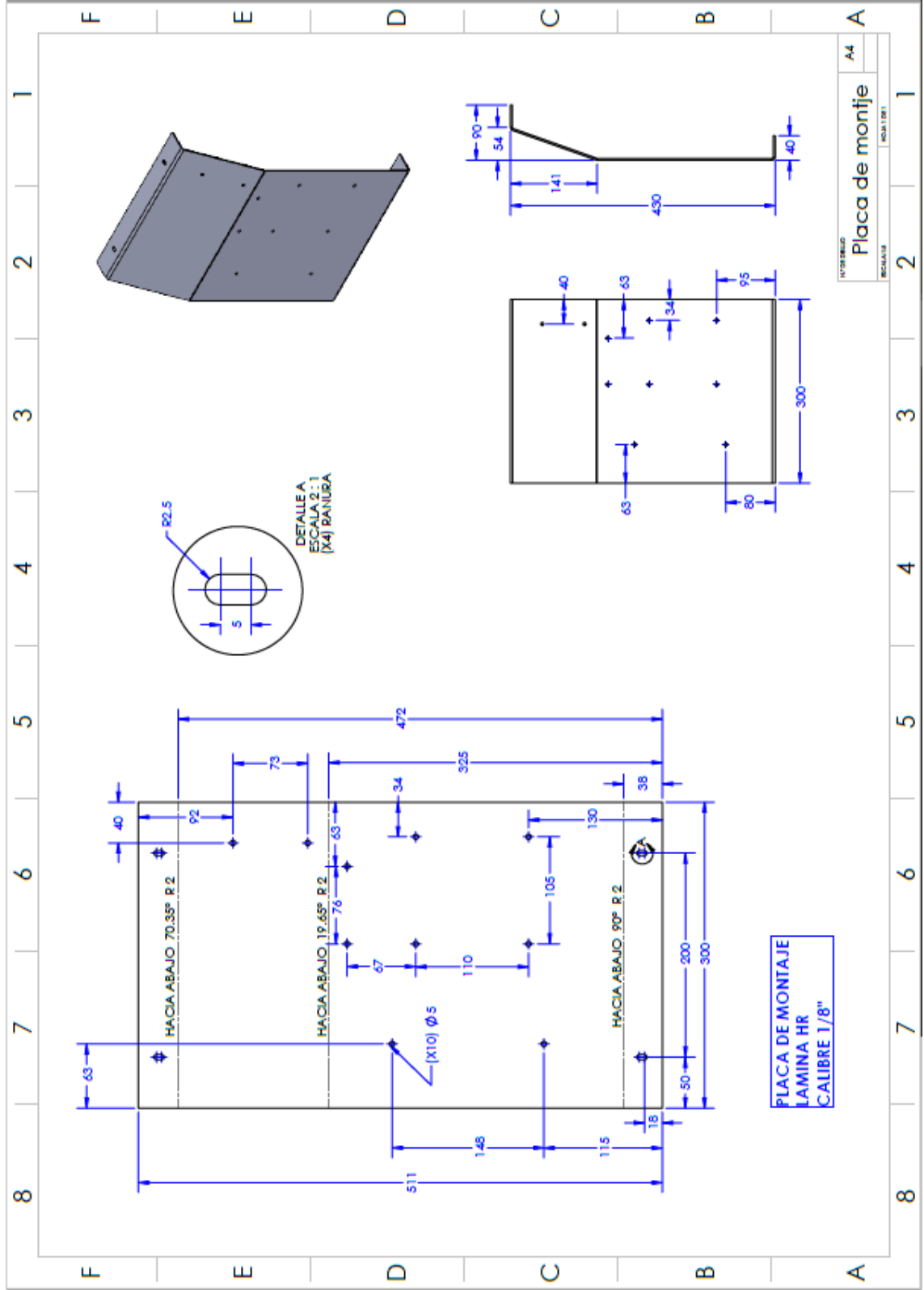


RANURA PARA
CHAVETA 4X4

polea eje motor

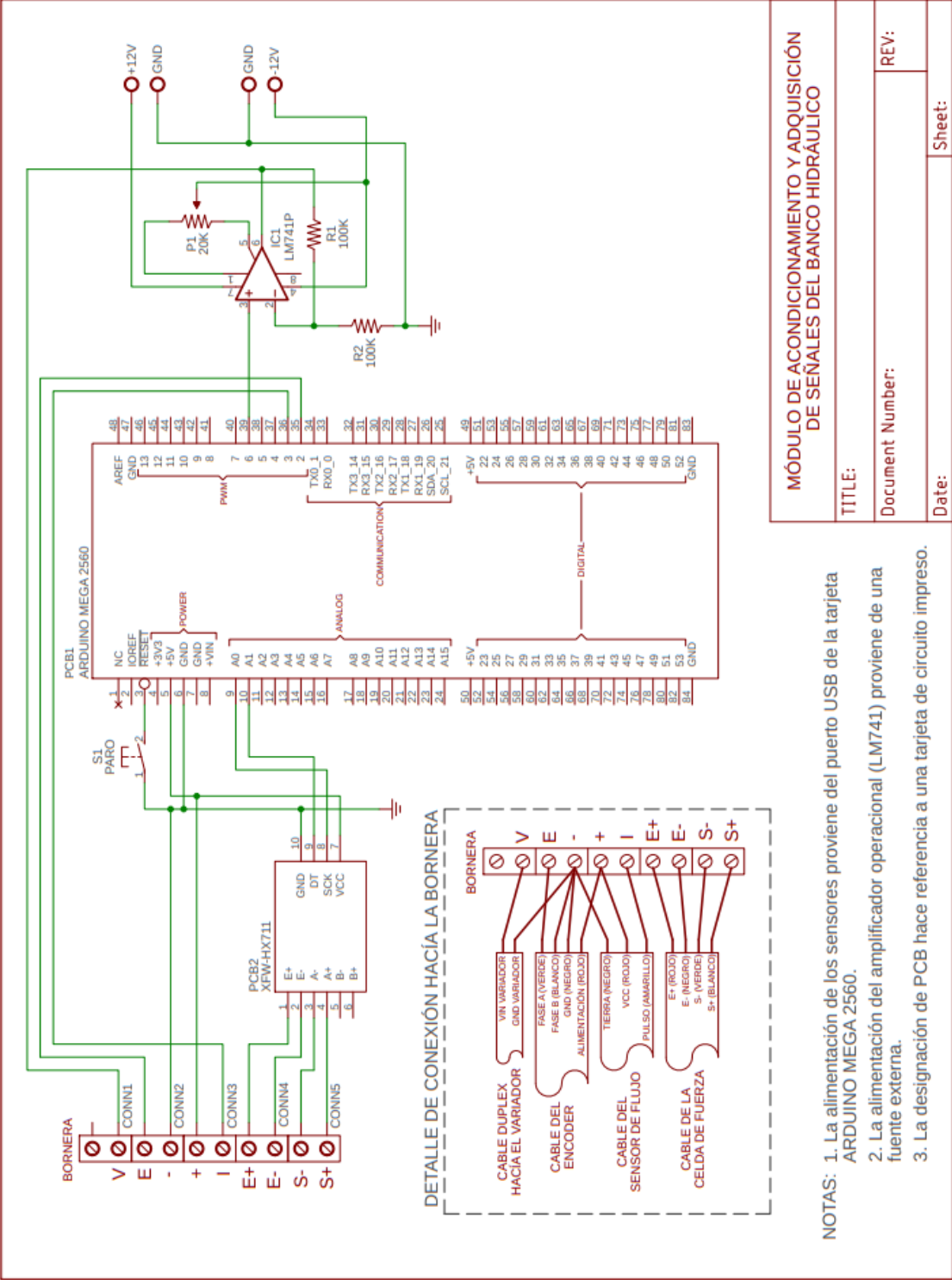






ANEXO C

**MÓDULO DE ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES DEL
BANCO HIDRÁULICO**



ANECO D

DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

	1600 rpm				2000 rpm				2200 rpm				2400 rpm			
	N (encoder) [rpm]	Q [LPM]	F [kg-F]	P [PSI]	N (encoder) [rpm]	Q [LPM]	F [kg-F]	P [PSI]	N (encoder) [rpm]	Q [LPM]	F [kg-F]	P [PSI]	N (encoder) [rpm]	Q [LPM]	F [kg-F]	P [PSI]
	1618	8,84	0,50	50	2046	8,42	0,51	50								
	1603	6,74	0,52		1996	10,10	0,50									
	1557	6,74	0,50		1937	10,52	0,49									
	1635	8,42	0,52		2037	9,68	0,50									
	1523	8,00	0,49		1954	9,26	0,48									
Promedios		7,75	0,51			9,60	0,50									
medición de Q con flujómetro		8,00				9,00										
error (%) entre Caudales		3,15				6,62										
	1575	7,16	0,64	100	1979	8,00	0,61	100	2185	8,83	0,53	100	2431	10,94	0,56	100
	1604	7,58	0,62		2008	8,42	0,59		2264	8,83	0,54		2429	10,93	0,55	
	1570	8,84	0,62		1932	7,58	0,59		2201	9,26	0,51		2378	12,19	0,55	
	1648	8,84	0,63		2008	8,00	0,60		2182	10,52	0,53		2410	9,67	0,55	
	1587	6,74	0,63		1932	7,16	0,59		2231	10,52	0,54		2398	10,09	0,55	
Promedios		7,83	0,63			7,83	0,60			9,59	0,53			10,76	0,55	
medición de Q con flujómetro		7,40				8,20				9,70				10,40		
error (%) entre Caudales		5,84				4,49				1,11				3,50		
	1694	8,42	0,77	150	1990	8,00	0,70	150	2222	8,42	0,71	150	2400	10,10	0,70	150
	1584	6,74	0,73		2033	7,16	0,72		2190	8,42	0,70		2415	10,09	0,68	
	1651	6,74	0,74		2015	8,42	0,72		2231	9,26	0,71		2429	9,68	0,70	
	1625	6,74	0,74		1973	7,58	0,71		2179	8,42	0,71		2470	10,52	0,71	
	1626	7,16	0,76		2015	8,42	0,72		2234	9,25	0,72		2387	9,26	0,67	
Promedios		7,16	0,75			7,92	0,71			8,75	0,71			9,93	0,69	
medición de Q con flujómetro		6,90				7,90				8,50				9,50		
error (%) entre Caudales		3,77				0,20				2,99				4,53		
	1623	6,74	0,86	200	1982	7,58	0,80	200	2191	8,42	0,75	200	2404	9,68	0,81	200
	1583	6,74	0,83		2013	7,58	0,83		2191	8,84	0,74		2417	9,26	0,79	
	1605	7,58	0,86		2009	7,16	0,83		2178	8,00	0,74		2387	8,00	0,80	
	1567	5,06	0,83		2013	7,16	0,82		2185	8,42	0,74		2404	9,25	0,81	
	1627	5,06	0,86		1969	7,16	0,82		2207	8,84	0,75		2407	8,84	0,79	
Promedios		6,24	0,85			7,33	0,82			8,50	0,74			9,01	0,80	
medición de Q con flujómetro		6,30				7,00				8,30				8,80		
error (%) entre Caudales		1,02				4,69				2,46				2,34		
	1571	5,90	0,94	240	2012	6,32	0,91	240	2181	7,58	0,88	240	2361	8,42	0,90	240

	1580	6,32	0,93		1969	6,32	0,89		2182	7,16	0,88		2453	8,84	0,95	
	1606	6,32	0,94		2021	6,32	0,92		2167	7,16	0,89		2344	8,00	0,89	
	1617	6,32	0,95		1968	7,16	0,89		2176	7,58	0,88		2472	8,42	0,94	
	1579	6,74	0,92		1986	6,74	0,89		2207	8,00	0,90		2458	8,00	0,93	
Promedios		6,32	0,94			6,57	0,90			7,50	0,89			8,34	0,92	
medición de Q con flujómetro		6,00				6,60				7,40				8,20		
error (%) entre Caudales		5,33				0,42				1,30				1,66		
	1606	5,06	1,06	280	1963	6,32	1,00	280	2159	6,74	0,98	280	2408	7,16	1,04	280
	1561	5,06	1,03		1998	6,32	1,03		2230	7,16	1,00		2398	8,42	1,05	
	1603	5,06	1,03		2049	6,32	1,05		2160	8,00	0,97		2440	7,58	1,05	
	1615	5,90	1,05		2022	7,58	1,02		2194	7,16	1,00		2467	7,58	1,00	
	1558	4,64	1,02		2044	5,90	1,05		2200	7,58	0,99		2403	8,42	1,01	
Promedios		5,14	1,04			6,49	1,03			7,33	0,99			7,83	1,03	
medición de Q con flujómetro		5,50				6,20				7,00				7,50		
error (%) entre Caudales		6,47				4,65				4,69				4,43		
	1632	5,06	1,20	320	2046	5,48	1,13	320	2157	6,74	1,04	320	2403	7,58	1,17	320
	1623	6,74	1,12		2003	5,48	1,09		2175	6,74	1,04		2454	7,58	1,18	
	1619	5,48	1,15		1949	5,90	1,08		2191	9,26	1,10		2417	8,42	1,15	
	1549	5,48	1,12		1979	5,90	1,11		2141	6,74	1,05		2394	7,16	1,18	
	1545	5,48	1,11		2028	5,90	1,11		2203	6,32	1,08		2424	7,16	1,15	
Promedios		5,65	1,14			5,73	1,10			7,16	1,06			7,58	1,17	
medición de Q con flujómetro		5,00				5,60				6,60				7,20		
error (%) entre Caudales		12,96				2,36				8,48				5,28		
	1623	4,22	1,25	360	2044	5,48	1,23	360	2152	6,32	1,17	360	2380	6,74	1,24	360
	1529	4,22	1,23		1995	7,58	1,20		2152	5,90	1,17		2404	8,42	1,20	
	1531	5,90	1,21		2034	5,48	1,24		2147	6,32	1,18		2349	6,74	1,24	
	1578	3,80	1,25		2012	5,06	1,21		2190	6,32	1,22		2380	7,16	1,27	
	1614	3,80	1,27		1941	5,06	1,17		2195	6,32	1,23		2409	7,16	1,22	
Promedios		4,39	1,24			5,73	1,21			6,24	1,19			7,24	1,23	
medición de Q con flujómetro		4,30				5,20				6,10				6,80		
error (%) entre Caudales		2,05				10,23				2,23				6,53		
	1619	3,80	1,36	400	2030	5,06	1,37	400	2235	5,90	1,40	400	2403	7,58	1,36	400
	1537	3,80	1,35		1983	5,90	1,33		2186	6,32	1,35		2367	7,16	1,31	
	1626	4,22	1,41		2033	5,06	1,37		2223	5,48	1,40		2332	6,74	1,39	
	1605	5,06	1,37		2000	5,90	1,32		2207	6,32	1,33		2419	6,74	1,40	
	1560	5,06	1,33		2024	5,06	1,35		2228	5,90	1,40		2388	6,74	1,38	
Promedios		4,39	1,36			5,40	1,35			5,98	1,38			6,99	1,37	

medición de Q con flujómetro		3,80				5,00				5,80				6,40		
error (%) entre Caudales		15,47				7,92				3,17				9,25		
	1631	4,22	1,51	440	2035	5,48	1,47	440	2215	5,48	1,50	440	2412	6,32	1,45	440
	1584	4,22	1,46		1990	5,06	1,44		2202	5,48	1,45		2364	6,32	1,52	
	1624	4,64	1,50		2015	4,64	1,41		2132	5,48	1,40		2393	5,90	1,52	
	1605	4,64	1,44		1989	5,48	1,42		2222	5,06	1,49		2460	5,90	1,46	
	1539	4,22	1,42		1991	4,64	1,43		2222	6,32	1,48		2413	5,90	1,46	
Promedios		4,39	1,47			5,06	1,43			5,56	1,46			6,07	1,48	
medición de Q con flujómetro		3,00				4,50				5,50				6,00		
error (%) entre Caudales		46,27				12,44				1,16				1,13		
	1635	2,96	1,61	480	1986	4,22	1,52	480	2175	5,48	1,56	480	2392	5,48	1,61	480
	1574	2,96	1,58		1984	4,22	1,53		2201	5,48	1,59		2399	5,48	1,66	
	1567	2,12	1,57		2019	4,22	1,57		2220	5,06	1,59		2463	5,48	1,63	
	1620	2,54	1,59		1981	4,22	1,52		2179	5,90	1,55		2463	5,48	1,61	
	1571	2,54	1,58		2001	4,64	1,56		2213	5,06	1,59		2400	5,48	1,63	
Promedios		2,62	1,59			4,30	1,54			5,40	1,58			5,48	1,63	
medición de Q con flujómetro		2,30				3,90				5,10				5,30		
error (%) entre Caudales		14,09				10,36				5,80				3,40		
	1614	1,70	1,74	520	1990	3,38	1,71	520	2259	5,06	1,74	520	2397	5,48	1,72	520
	1592	3,38	1,67		1994	3,80	1,69		2198	4,64	1,70		2445	5,48	1,66	
	1600	3,38	1,76		1954	3,80	1,67		2251	4,64	1,75		2349	5,90	1,72	
	1627	2,12	1,74		1994	3,80	1,73		2164	5,90	1,67		2398	5,48	1,66	
	1567	2,12	1,70		2005	3,38	1,69		2168	5,48	1,66		2366	5,90	1,71	
Promedios		2,54	1,72			3,63	1,70			5,14	1,70			5,65	1,69	
medición de Q con flujómetro		1,50				3,10				4,50				4,90		
error (%) entre Caudales		69,33				17,16				14,31				15,27		
					1998	3,38	1,84	560	2206	4,22	1,80	560	2385	4,64	1,88	560
					1953	2,96	1,78		2184	4,22	1,80		2424	4,64	1,91	
					1991	2,96	1,83		2188	4,22	1,80		2414	4,64	1,86	
					2006	3,80	1,78		2204	4,64	1,80		2400	4,64	1,85	
					1961	3,38	1,77		2188	4,22	1,79		2372	4,64	1,88	
Promedios						3,30	1,80			4,30	1,80			4,64	1,88	
medición de Q con flujómetro						2,40				3,80				4,20		
error (%) entre Caudales						37,33				13,26				10,48		
Promedio N									2151	3,80	1,88	600	2372	5,06	2,01	600
									2224	3,80	1,98		2426	4,64	1,96	
									2151	3,80	1,88		2396	4,22	1,98	

									2179	3,80	1,97		2416	4,22	1,96	
									2205	3,80	1,89		2372	4,22	1,98	
Promedios										3,80	1,92		2372,00	4,47	1,98	
medición de Q con flujómetro										3,10				3,50		
error (%) entre Caudales										22,58				27,77		
Promedio N	1596				1997				2194				2405			